

O sistema é composto de um analisador de impedância modelo HP4396B (veja Figura 3-20), de um kit de teste modelo HP4396A1 (veja Figura 3-21), de uma cavidade de microondas, de uma bobina de excitação, de uma fonte de corrente e de um amplificador de baixo ruído, de uma placa analógico/digital e de um computador.

Na Figura 3-20 é mostrada uma foto do sistema de medidas de *MI* a altas frequências do LMMM – UFSM, onde está mostrada a cavidade de microondas já posicionada para fazer as medidas de impedância.



Figura 3-20. Foto de parte do sistema de medidas de *MI* do LMMM – UFSM.

Por se tratar de uma peça importante no sistema de medidas, a Figura 3-21 mostra um desenho esquemático do kit de teste de impedância HP4396A1, onde podemos ver os elementos usados para a calibração da linha em 50Ω : aberto, curto e carga de 50Ω . Com esse kit é calibrado e definido um dos planos de referência. O analisador de impedância recebe os sinais dos três elementos de calibração, faz os cálculos e define esse plano a partir desse ponto. Assim, estamos prontos para fazer as medidas de impedância na amostra. O analisador pode nos fornecer vários tipos de sinais, mas nas medidas de impedância capturamos os sinais da resistência e da reatância da amostra, as quais compõem a impedância da mesma (veja a equação (2-2)).

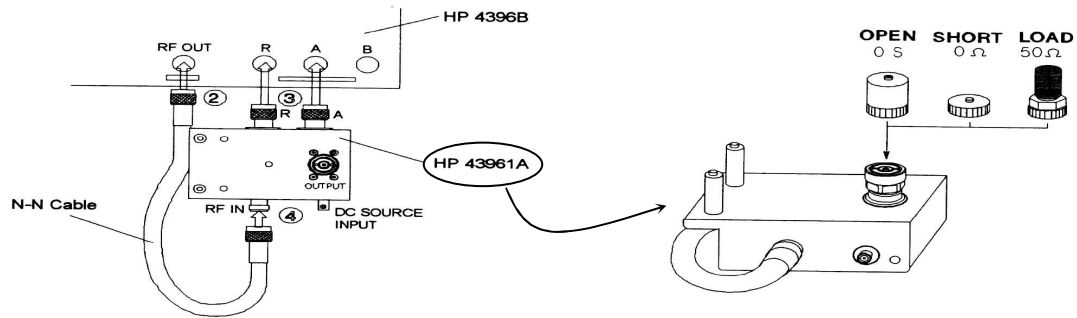


Figura 3-21. Desenho do kit de teste de impedância HP43961A usado na calibração e medidas de MI [92].

As medidas da impedância na amostra são feitas pelo analisador de impedância que mede a tensão elétrica V e a corrente elétrica I na amostra conforme mostrado no esquema da Figura 3-22. Nas posições A e R temos dois voltímetros que medem as tensões elétricas naqueles pontos, onde o voltímetro da saída A (V_I) mede uma tensão em cima do resistor R_0 que vai dar a corrente I que está passando na amostra e o voltímetro da saída R (V_V) mede uma tensão em cima de outro resistor R_0 e fornece a tensão elétrica V na amostra.

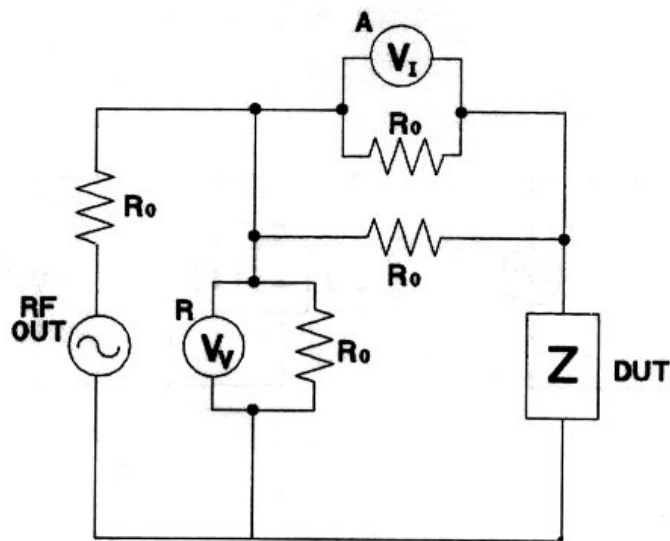


Figura 3-22. Esquema da medida feita pelo analisador de impedância nas amostras [93].

Resumindo, o analisador faz passar uma corrente com frequências variáveis (RF OUT) na amostra e recebe o sinal de I e V através das entradas A e R, respectivamente, que são as leituras dos dois voltímetros citados anteriormente. No circuito mostrado acima, R_0 são resistências padrões de 50Ω cada para que a impedância de todo o sistema esteja casada em 50Ω . De posse dos valores de I e V para cada frequência, o analisador mostra na tela um

espectro de impedância em função da frequência da corrente de sonda na faixa de 100kHz – 1.8GHz.

Um programa usando o “software HPVee” (windows®) foi desenvolvido pelo Dr. Alexandre Da Cas Viegas e instalado no computador do sistema de medidas. Com ele, podemos controlar todos os instrumentos do sistema e adquirir os dados do analisador de impedância. Nesse programa, podemos definir se queremos uma medida com histerese ou não, os passos e as intensidades máximas do campo magnético aplicado. Uma foto da tela principal desse programa está mostrada na Figura 3-23.

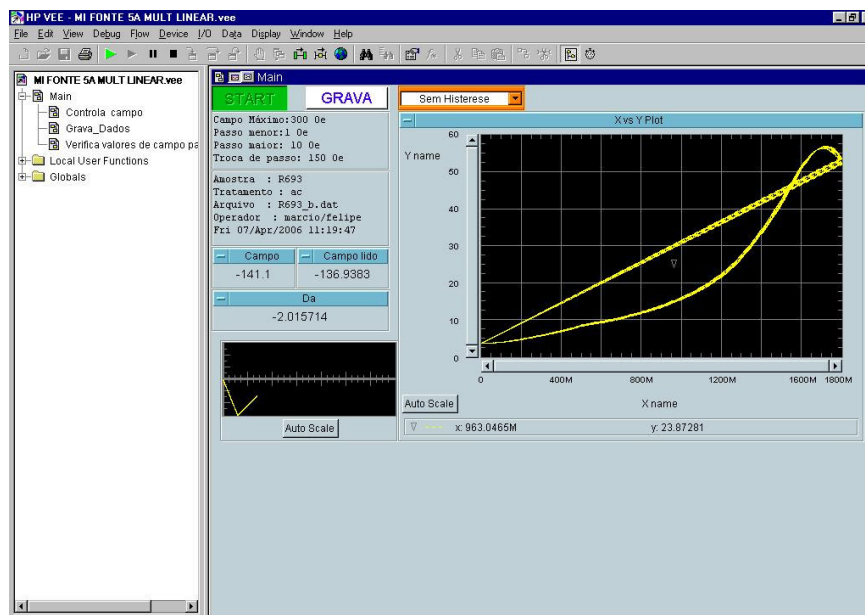


Figura 3-23. Foto da tela principal do programa em HPVee para a aquisição dos sinais de impedância, onde o eixo x é a frequência em MHz e o eixo y é a resistência em Ohm.

Nesse capítulo vimos todos os sistemas e processos usados desde a fabricação até a caracterização de nossas amostras. Agora veremos os resultados obtidos e faremos o comentário dos mesmos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitas medidas de magnetização e de magnetoimpedância para caracterização magnética das amostras. Após esses resultados, observamos que particularmente nas amostras com razão igual a quatro entre a espessura do Py e da Ag $\left(\frac{\tau_{Py}}{\tau_{Ag}} = 4\right)$ apresentavam, além de um ótimo desempenho com relação à MI, um resultado intrigante, pois uma estrutura de múltiplos picos nas curvas de MI era observada para algumas combinações de bicamadas. Essa estrutura foi observada com maior clareza na amostra de $[Py(100\text{Å})/Ag(25\text{Å})]_{x15}$, ou seja, com 15 bicamadas de Py/Ag e razão igual a 4 entre as respectivas espessuras.

Assim, decidimos pesquisar em detalhes as amostras com essa razão na composição. Os resultados de magnetização e de MI, para todas as amostras estudadas, são apresentados a seguir.

4.1. Medidas de magnetização

As medidas de magnetização foram feitas em um VSM, como comentado e mostrado anteriormente na seção 3.5. As medidas foram realizadas sempre com o campo magnético externo aplicado longitudinalmente ao eixo maior da amostra, como ilustrado na Figura 3-16. As amostras foram cortadas em duas geometrias diferentes que denominamos de corte longitudinal e de corte transversal, como mostrado na Figura 3-14. A seguir, veremos separadamente as curvas de magnetização para os dois tipos de espaçadores usados em nossas multicamadas.

4.1.1. Multicamadas de Py/Ag

Começamos crescendo bicamadas com 100Å de Py separadas por 7Å de Ag, variando as repetições em 15, 50 e 100 vezes. Nas curvas de magnetização dessas amostras, mostradas na Figura 4-1, Figura 4-2 e Figura 4-3, podemos perceber que houve uma pequena indução de anisotropia, crescente com o aumento do número de bicamadas. O campo de anisotropia

máximo foi de ~22 Oe na amostra com corte longitudinal e 100 bicamadas. O campo coercivo variou muito pouco mas, mesmo assim, teve um pequeno decréscimo com o aumento do número de bicamadas, ficando em torno de 1 Oe para os dois tipos de cortes.

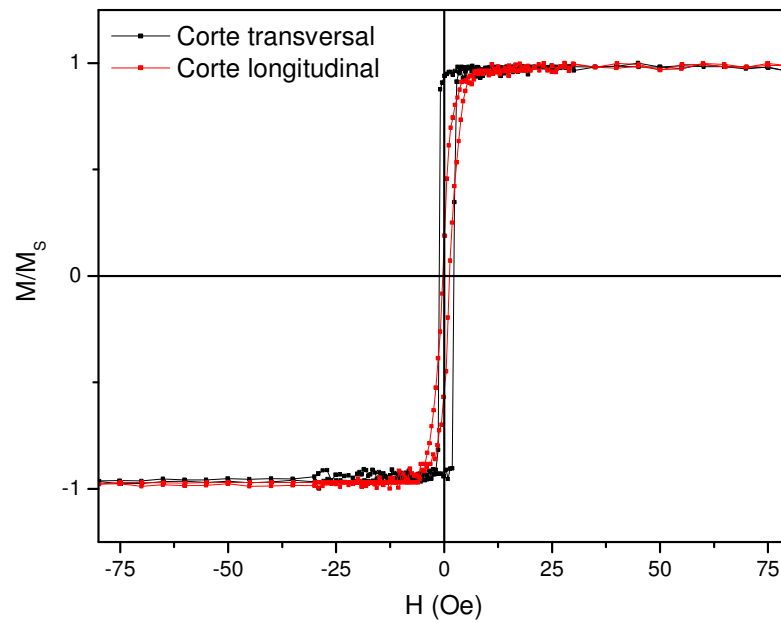


Figura 4-1. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Ag(7Å)]x15.

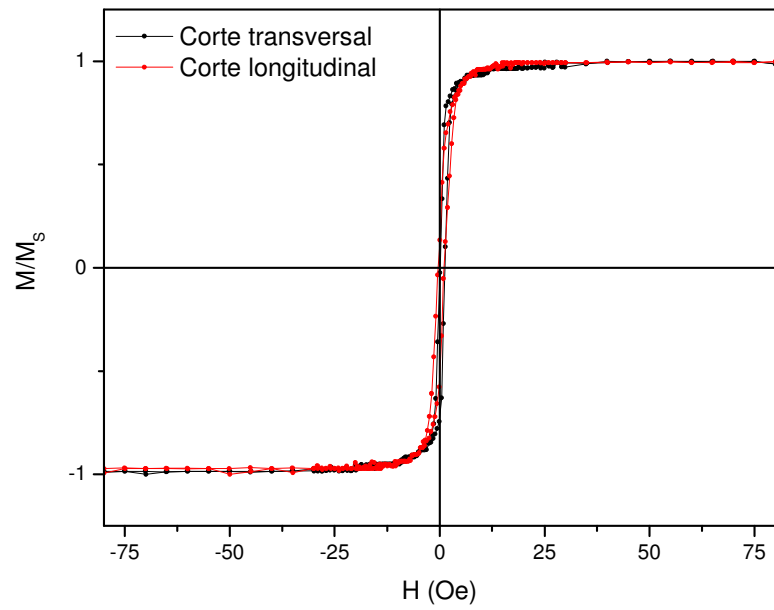


Figura 4-2. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{\times 50}$.

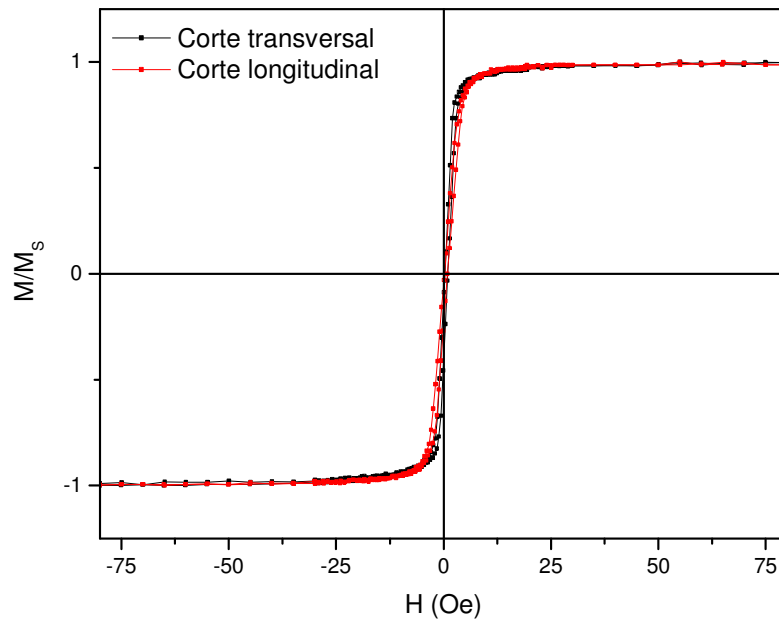


Figura 4-3. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{\times 100}$.

As amostras com 100Å de Py separadas por 25Å de Ag foram inicialmente crescidas séries com 15, 50 e 100 bicamadas como a série anterior. Como os resultados de MI foram muito satisfatórios e observamos comportamentos diferentes dos que já havíamos constatado, crescemos mais outras duas séries intermediárias com 30 e 70 bicamadas. Nessa série, mostrada nas Figura 4-4, Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7 e Figura 4-8, constatamos que a anisotropia induzida foi maior que a das amostras da série anterior e que praticamente não há variação com o aumento do número de bicamadas. O campo de anisotropia foi praticamente o mesmo em todas as amostras com corte longitudinal, ficando em torno de 90 Oe. Foi observado um aumento no campo coercivo das amostras, com corte longitudinal, com 15 ($H_C \sim 0$) para as amostras com 30 bicamadas ($H_C \sim 5$ Oe), onde esse campo começa a diminuir para as amostras com 50 até 100 bicamadas. Nas amostras com corte transversal, o campo coercivo diminuiu com o aumento do número de bicamadas, tendo seu valor máximo de ~ 3 Oe na amostra com 15 bicamadas.

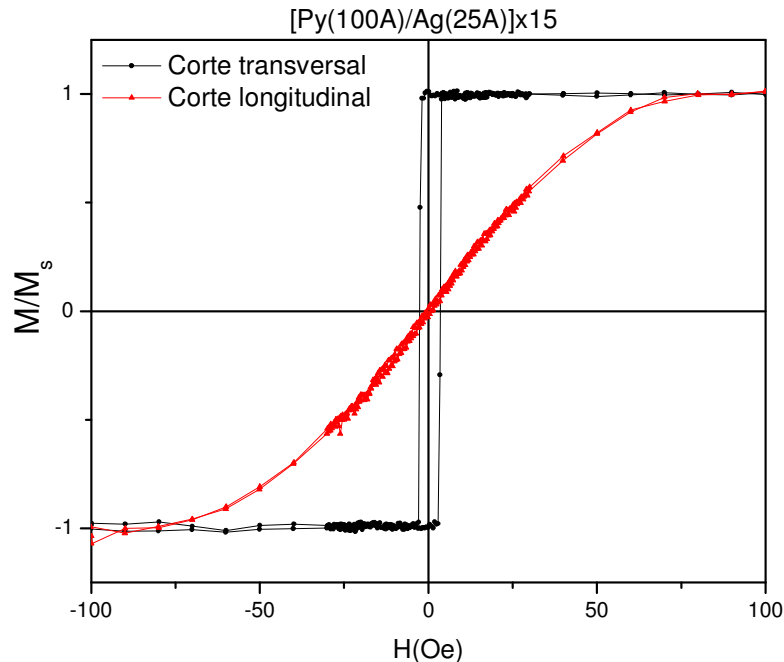


Figura 4-4. Curvas de magnetização para a amostra $[Py(100\text{\AA})/Ag(25\text{\AA})] \times 15$.

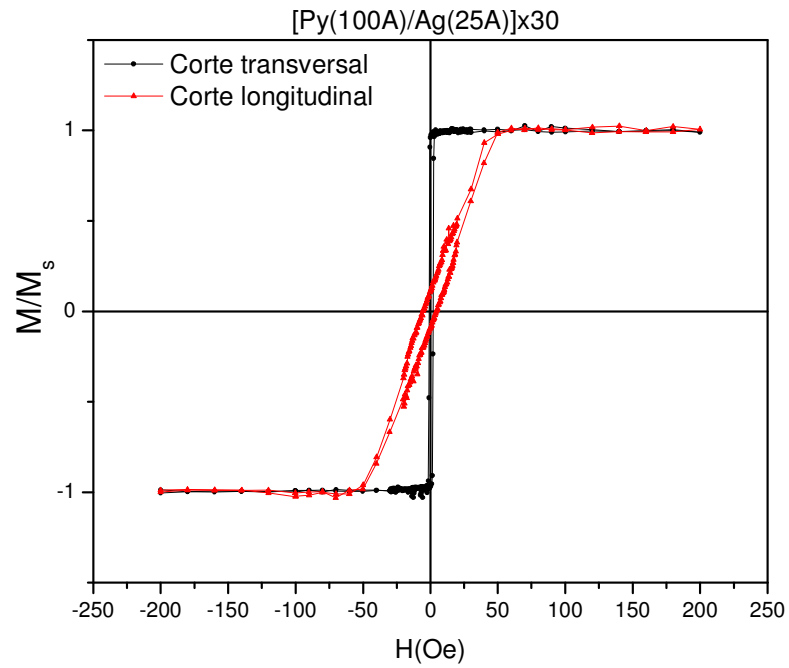


Figura 4-5. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(25\text{\AA})]_{\times 30}$.

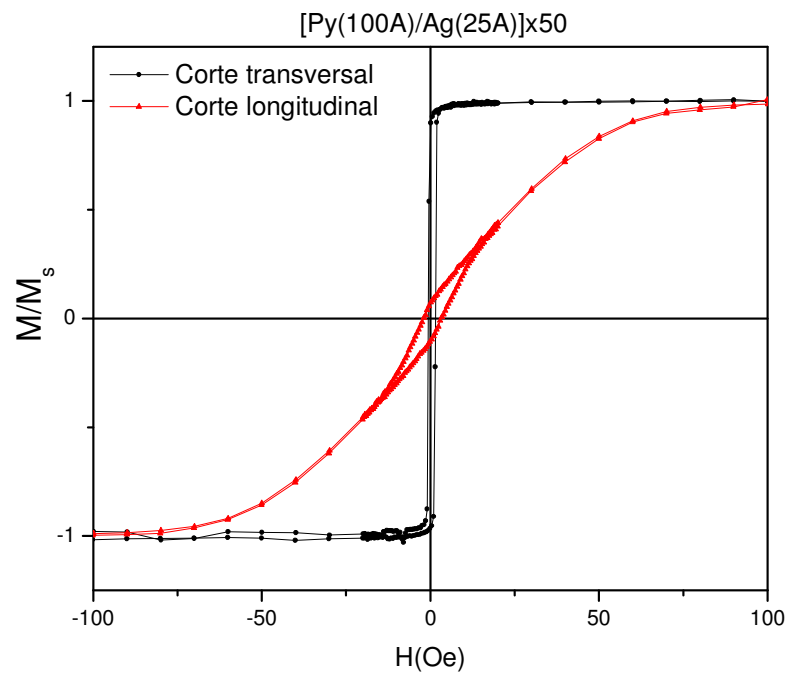


Figura 4-6. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(25\text{\AA})]_{\times 50}$.

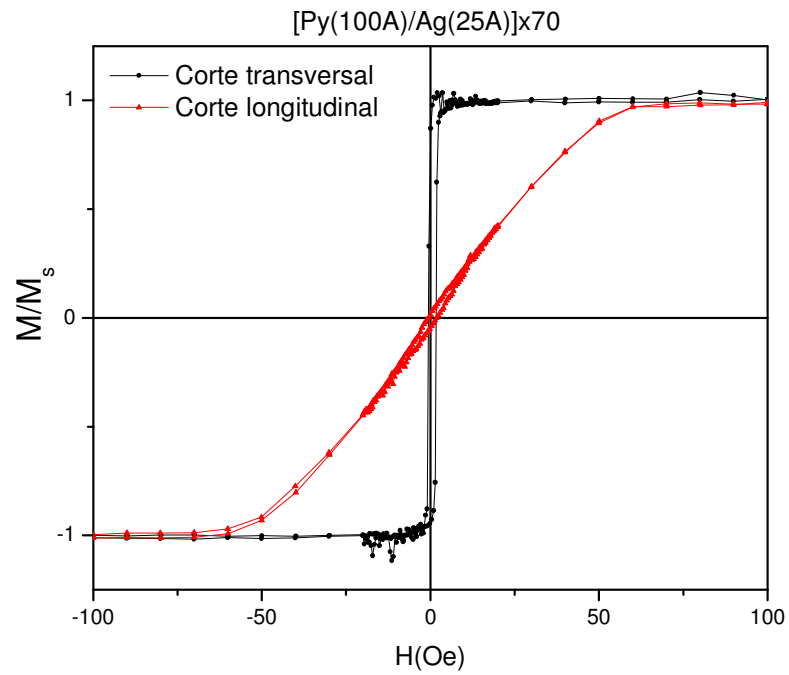


Figura 4-7. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Ag(25Å)]x70.

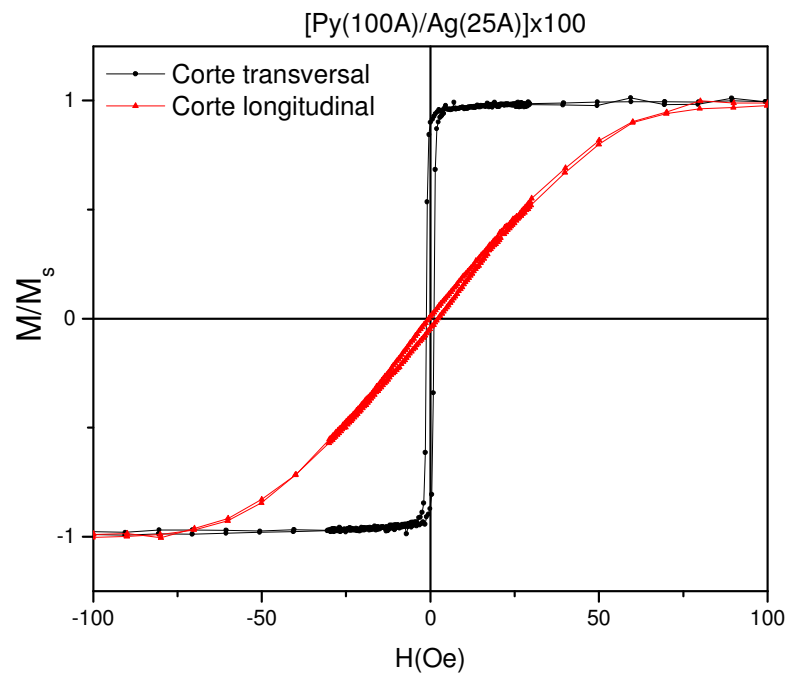


Figura 4-8. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Ag(25Å)]x100.

Também foram feitas amostras circulares utilizando máscaras de 3 e 5mm de diâmetro. Essas amostras foram feitas para realização de medidas de magnetização com variação no ângulo de aplicação do campo magnético externo. Na Figura 4-9 temos as medidas de magnetização para uma amostra com 100Å de permalloy e 25Å de prata com 50 bicamadas onde se pode observar uma indução mais forte de anisotropias no ângulo de 0° entre a direção de aplicação do campo e a direção de movimento do substrato sobre o canhão. Então, a direção de fácil magnetização está perpendicular ao eixo de movimento, logo podemos dizer que temos anisotropia perpendicular a essa direção.

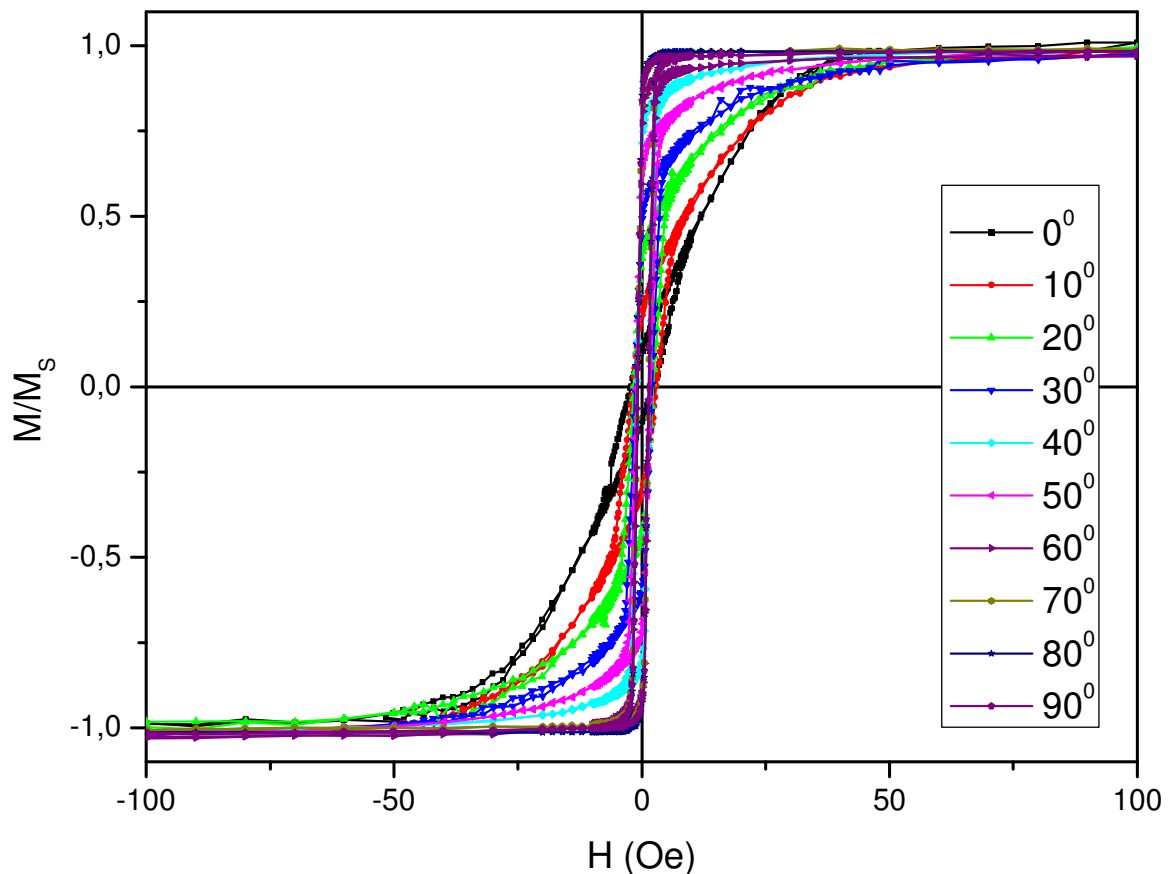


Figura 4-9. Curvas de magnetização, em função do ângulo de aplicação do campo magnético externo, para a amostra circular [Py(100Å)/Ag(25Å)]x50.

Na série de amostras com 100Å de Py separadas por 100Å de Ag temos apenas dois tipos de amostras, as com 15 e 100 bicamadas. As curvas de magnetização das Figura 4-10 e Figura 4-11 mostram que houve uma forte indução de anisotropia que para qual não podemos afirmar valores com precisão porque não alcançamos campos altos o suficiente para saturá-las magneticamente. Pode-se dizer entretanto que essa anisotropia determinou um campo de anisotropia maior que os 90 Oe observados nas amostras com 100Å de Py separadas por 100Å de Ag $\left(\frac{\tau_{Py}}{\tau_{Ag}} = 4 \right)$ e corte transversal. Para as amostras com corte longitudinal, o campo de anisotropia se manteve praticamente com o mesmo valor, em torno de 23 Oe. O campo coercivo das amostras com corte transversal diminuiu de 12 para 7 Oe ao contrário das amostras com corte longitudinal, que aumentaram seu campo coercivo de 1,5 para 17 Oe, aproximadamente.

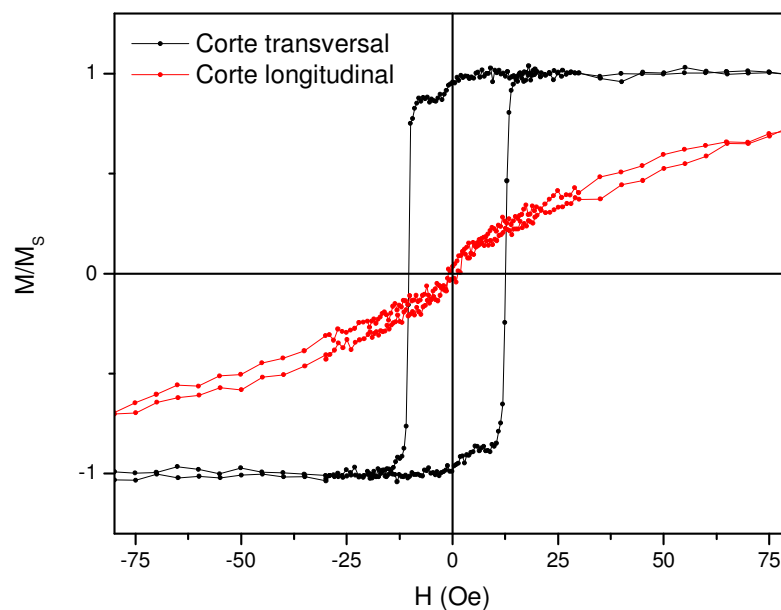


Figura 4-10. Curvas de magnetização para a amostra $[Py(100\text{\AA})/Ag(100\text{\AA})]_{x15}$.

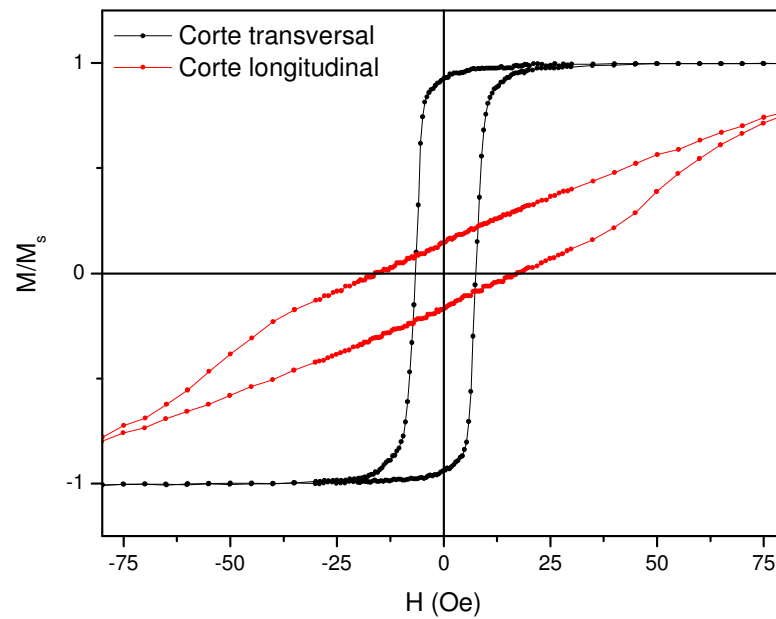


Figura 4-11. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Ag(100Å)]x100.

Nas amostras com 200Å de Py separadas por 14Å de Ag temos uma série com 15, 50 e 100 bicamadas. O comportamento magnético dessas amostras foi bem semelhante ao da série de amostras com 100Å de Py separadas por 7Å de Ag, que têm a mesma razão entre as espessuras $\left(\frac{\tau_{Py}}{\tau_{Ag}} = \frac{100}{7}\right)$. Nas Figura 4-12, Figura 4-13 e Figura 4-14, podemos perceber que houve uma fraca indução de anisotropia, a qual foi crescente com o aumento do número de bicamadas. O campo de anisotropia máximo ficou em torno de 30 Oe na amostra com corte longitudinal e 100 bicamadas. O campo coercivo teve um pequeno decréscimo com o aumento do número de bicamadas, e variou em torno de 1,5 e 0,5 Oe tanto para as amostras com corte longitudinal quanto corte transversal.

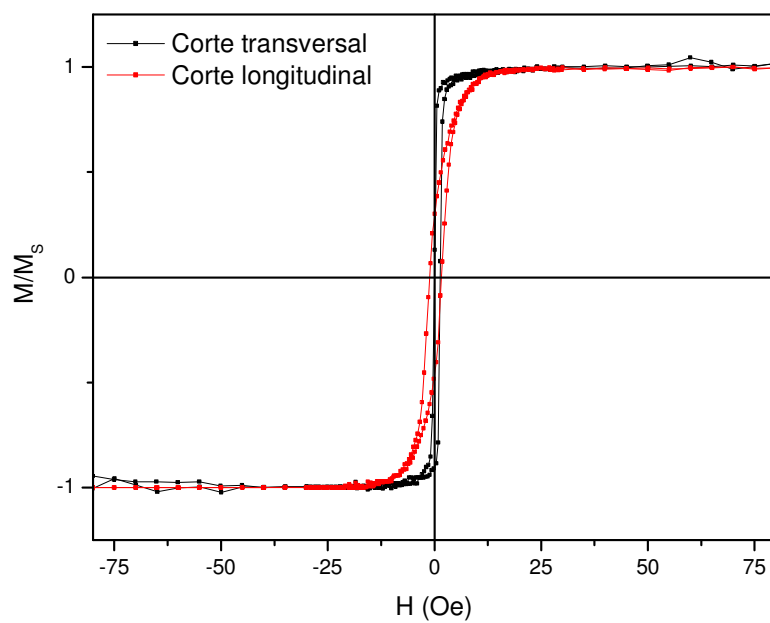


Figura 4-12. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(200\text{\AA})/\text{Ag}(14\text{\AA})]_{x15}$.

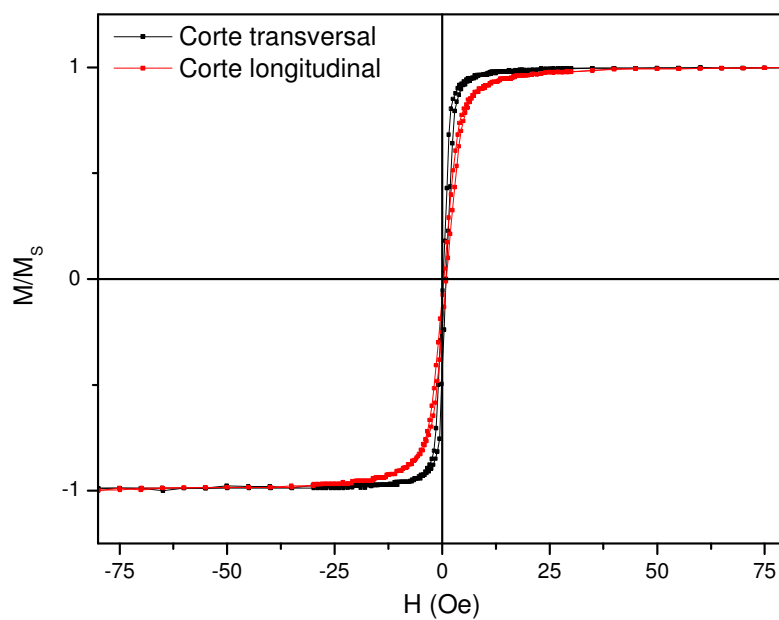


Figura 4-13. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(200\text{\AA})/\text{Ag}(14\text{\AA})]_{x50}$.

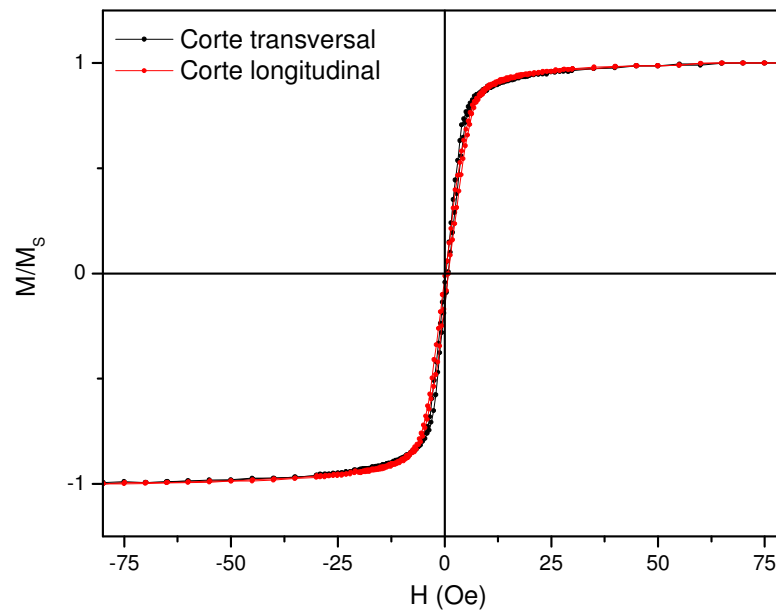


Figura 4-14. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(200\text{\AA})/\text{Ag}(14\text{\AA})]_{\times 100}$.

Na série de amostras novamente com a razão igual a 4 entre as espessuras $\left(\frac{\tau_{\text{Py}}}{\tau_{\text{Ag}}} = 4 \right)$,

temos amostras com 15 e 100 bicamadas apenas. Nas Figura 4-15 e Figura 4-16, as curvas de magnetização são semelhantes as da série com mesma razão entre as espessuras, porém com campo de anisotropia menor, em torno de 30 Oe para a amostra com corte longitudinal e 15 bicamadas. A amostra com 100 bicamadas e mesmo corte longitudinal apresentou um campo de anisotropia semelhante ao da série anterior, em torno de 80 Oe. Nas amostras com corte transversal, o campo de anisotropia aumentou de 10 para 25 Oe, aproximadamente, com o aumento do número de bicamadas. O campo coercivo nas amostras com corte transversal manteve-se praticamente o mesmo, em torno de 2 Oe. Já nas amostras com corte longitudinal, o campo coercivo aumentou com o aumento do número de bicamadas, passou de 0 para 3 Oe, aproximadamente.

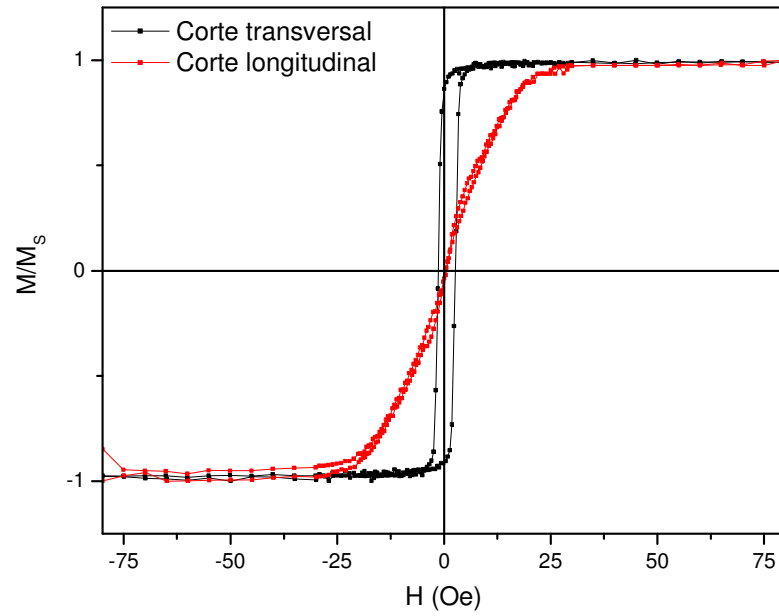


Figura 4-15. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(200\text{\AA})/\text{Ag}(50\text{\AA})]_{\times 15}$.

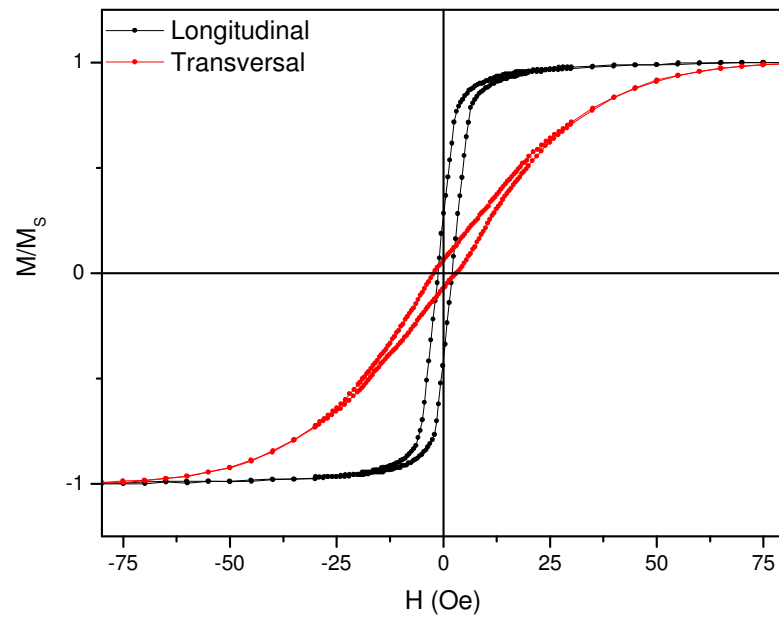


Figura 4-16. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(200\text{\AA})/\text{Ag}(50\text{\AA})]_{\times 100}$.

Na última série de amostras com espaçadores de prata, amostras com 200Å de Py separadas por 200Å de Ag, também temos amostras com 15 e 100 bicamadas. Essa série é a que tem a maior espessura do espaçador (camada de Ag) e percebemos que houve uma forte indução de anisotropia nas amostras. Na Figura 4-17, podemos observar que para a amostra com corte longitudinal tem-se um comportamento um pouco diferente dos anteriores, pois a curva de magnetização tem mais de uma inclinação, ou seja, mais de uma direção preferencial para a magnetização. Seu campo de anisotropia ficou em torno de 40 Oe e o campo coercivo em torno de 2,5 Oe. Na mesma multicamada, porém com corte transversal, podemos perceber que ela apresentou um campo de anisotropia menor, em torno de 12 Oe e um campo coercivo maior, em torno de 5 Oe. Na Figura 4-18, para a amostra com corte longitudinal observa-se que o campo de anisotropia e o campo coercivo aumentaram para valores próximos de 80 e 2,5 Oe, respectivamente. Para a mesma multicamada, mas com corte transversal, temos um comportamento diferente, ou seja, ela também apresenta duas inclinações na curva de magnetização, tendo a aparência de duas “curvas de histerese” foram emendadas. Isso indica que essa amostra tem duas direções preferenciais para a magnetização, que estão bem definidas. Os campos de anisotropia e coercivo ficaram em torno de 30 e 3 Oe respectivamente.

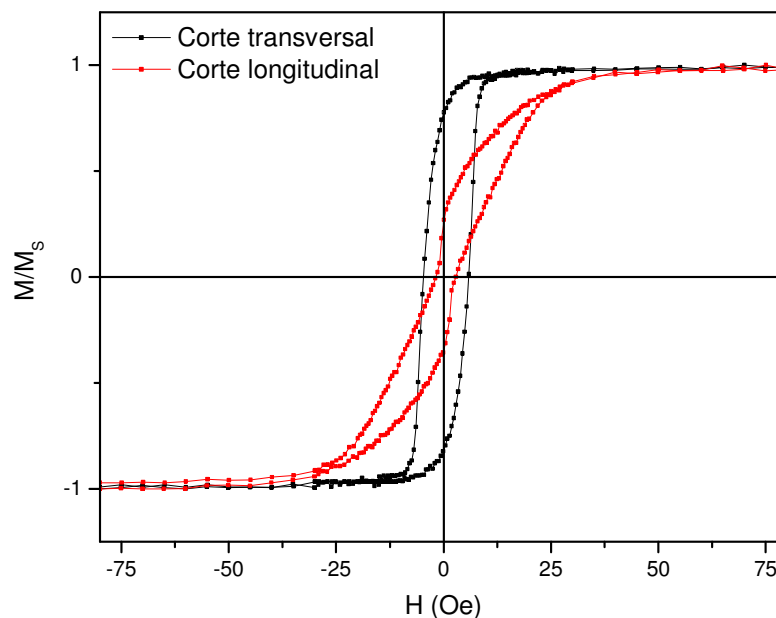


Figura 4-17. Curvas de magnetização para a amostra [Py(200Å)/Ag(200Å)]x15.

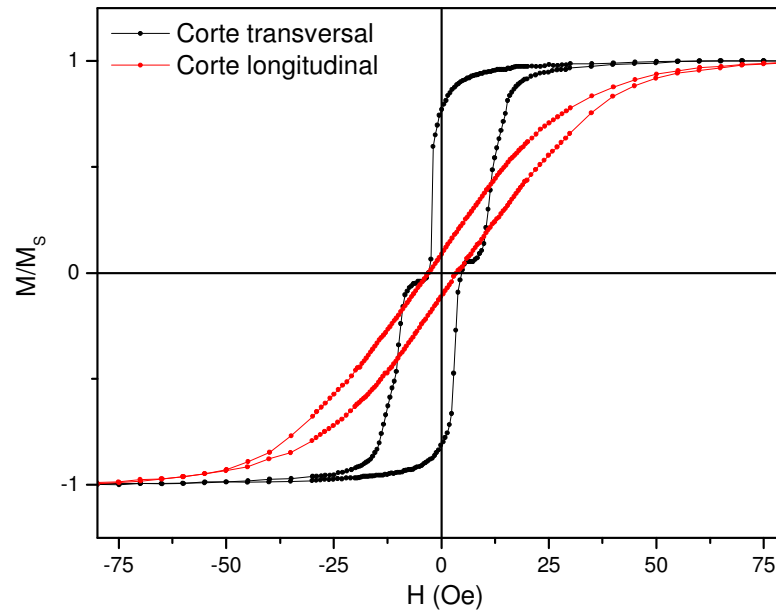


Figura 4-18. Curvas de magnetização para a amostra $[\text{Py}(200\text{\AA})/\text{Ag}(200\text{\AA})]_{\times 100}$.

Em todas as curvas de magnetização mostradas anteriormente, ficou claro que elas apresentam uma direção fácil e outra difícil para a magnetização. Também dá para perceber que a direção mais fácil para a magnetização é transversal à direção de movimento do substrato sobre o canhão, pois nas amostras com corte transversal era mais fácil atingir a saturação. Logo, as amostras com corte longitudinal foi mais difícil de atingir a saturação, assim, podemos dizer que a direção fácil é a do corte transversal e a direção difícil é a do corte longitudinal.

4.1.2. Multicamadas de Py/Cu

Como mencionamos anteriormente, as amostras com a relação $\frac{\tau_{Py}}{\tau_{Ag}} = 4$ apresentou resultados surpreendentes. Por isso, as amostras com espaçadores de Cu foram crescidas com essa mesma relação de espessura e com 15, 30, 50, 70 e 100 bicamadas.

Nas amostras com espaçadores de Cu houve uma indução de anisotropia menor do que nas amostras com espaçadores de Ag. Na Figura 4-19, Figura 4-20, Figura 4-21, Figura 4-22 e Figura 4-23, estão mostradas as curvas de magnetização para as amostras com 100Å de Py separadas por 25Å de Cu com 15, 30, 50, 70 e 100 bicamadas, respectivamente. Em todas essas amostras, o campo coercivo foi pequeno e se manteve praticamente o mesmo, em torno de 1Oe, tanto para as amostras com corte longitudinal quanto para as com corte transversal. Nas amostras com corte transversal, os campos de anisotropia aumentaram de 3,5 para 6Oe com o aumento do número de bicamadas. Nas amostras com corte longitudinal, os campos de anisotropia aumentaram de 5 para 9Oe com o aumento do número de bicamadas.

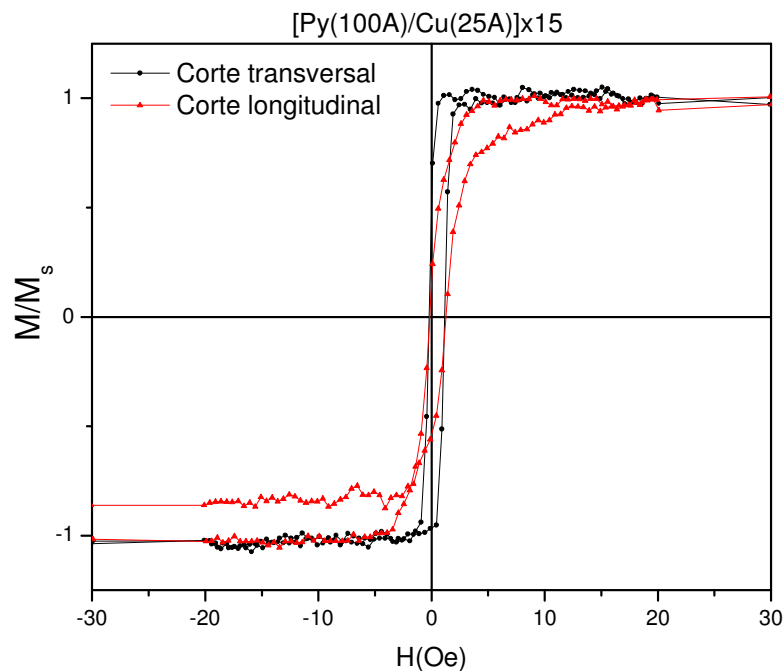


Figura 4-19. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Cu(25Å)]x15.

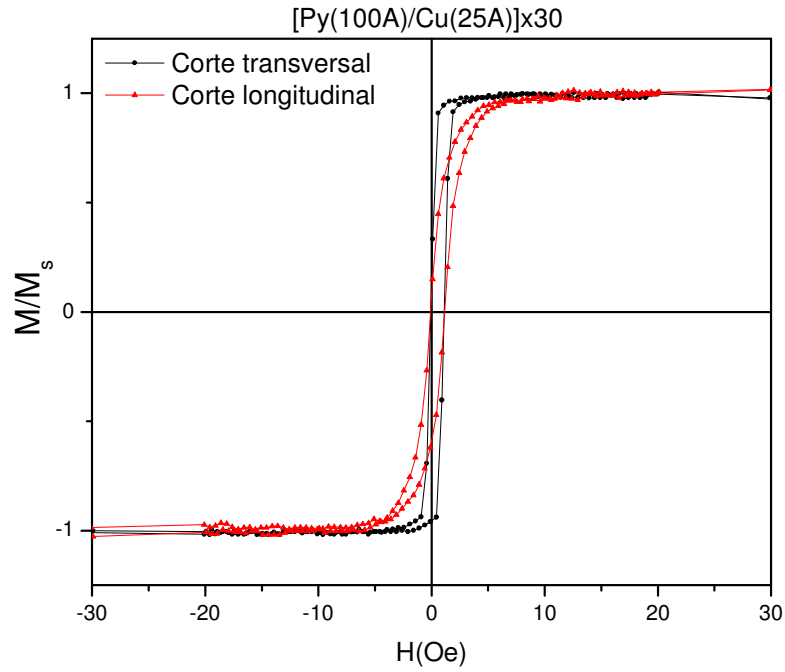


Figura 4-20. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Cu(25Å)]x30.

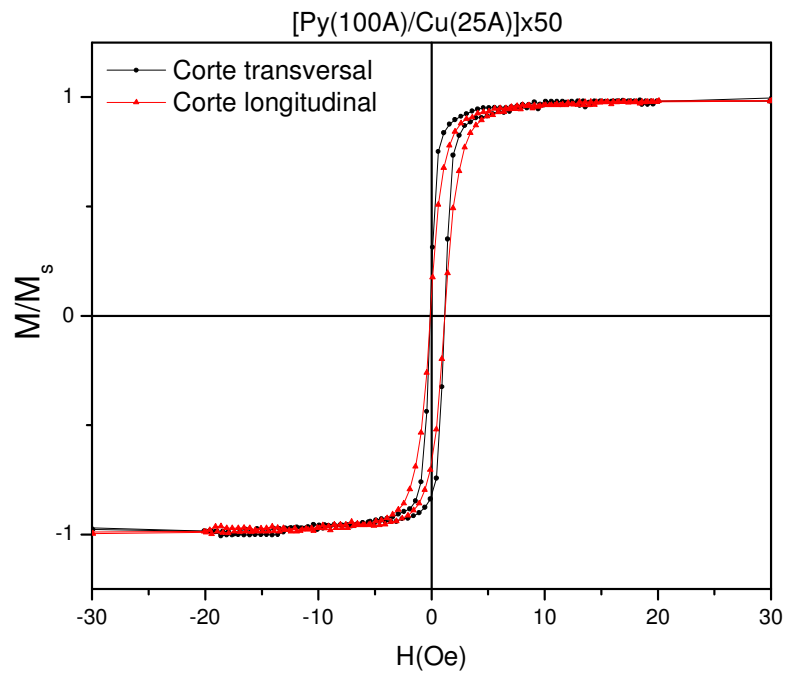


Figura 4-21. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Cu(25Å)]x50.

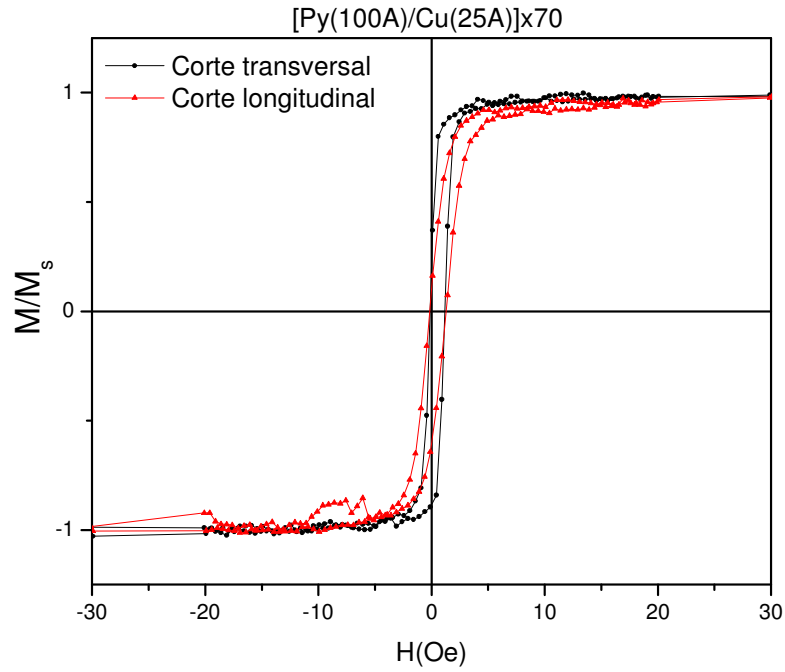


Figura 4-22. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Cu(25Å)]x70.

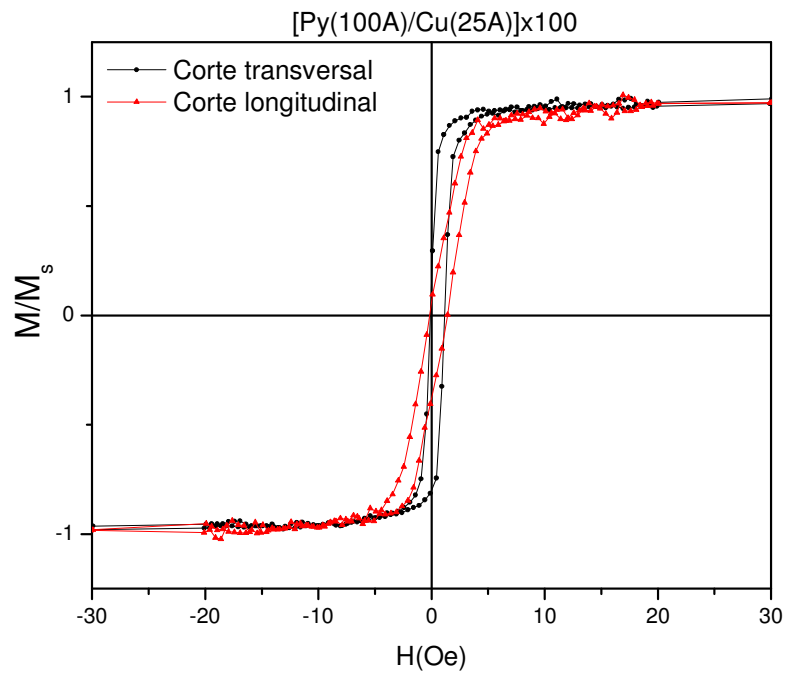


Figura 4-23. Curvas de magnetização para a amostra [Py(100Å)/Cu(25Å)]x100.

Também foram feitas amostras circulares com espaçadores de cobre utilizando máscaras de 3 e 5mm de diâmetro. Essas amostras foram feitas para realização de medidas de magnetização com variação no ângulo de aplicação do campo magnético externo. Na Figura 4-24 temos as medidas de magnetização para uma amostra com 100Å de permalloy e 25Å de cobre com 50 bicamadas onde se pode observar uma indução um pouco mais forte de anisotropias no ângulo de 0° entre a direção de aplicação do campo e a direção de movimento do substrato sobre o canhão. Então, a direção de mais fácil magnetização está perpendicular ao eixo de movimento, logo, podemos dizer que temos anisotropia perpendicular a essa direção, porém muito fraca comparada com as anisotropias induzidas nas amostras com espaçadores de prata.

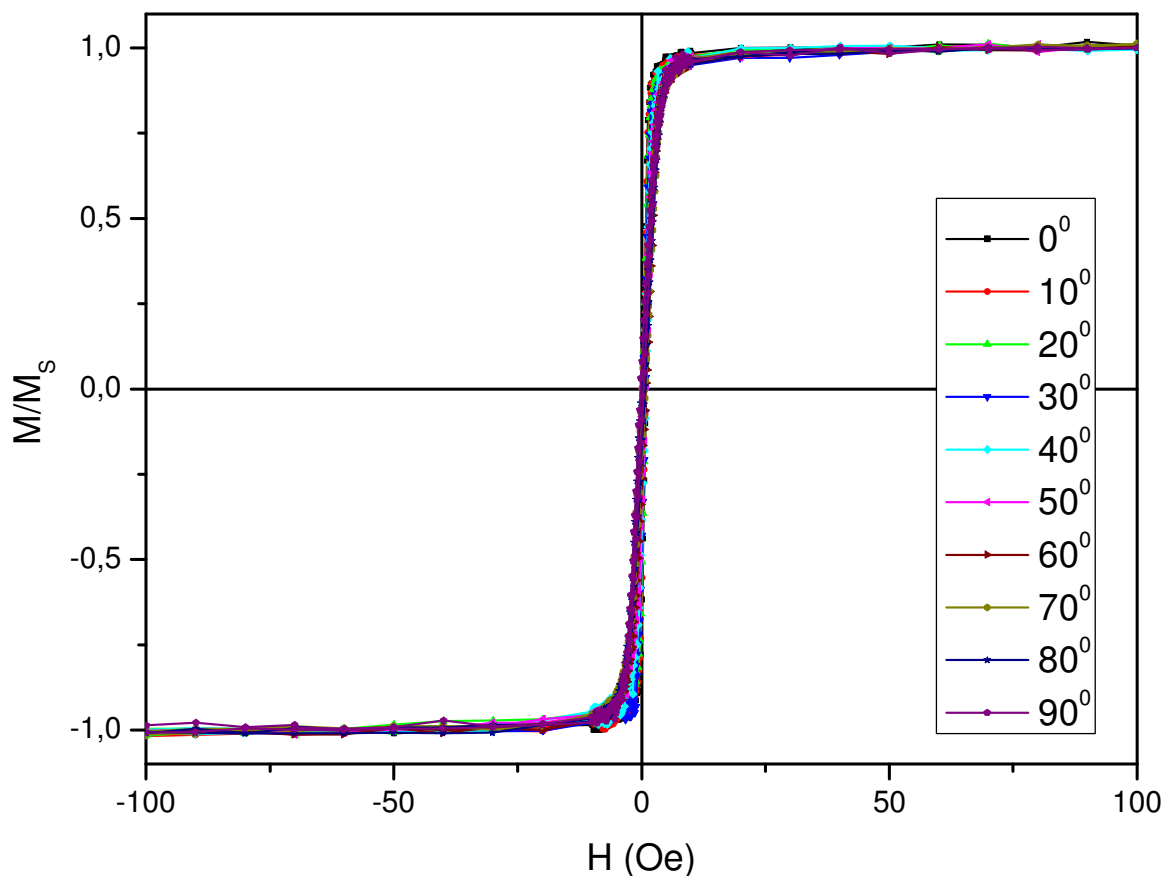


Figura 4-24. Curvas de magnetização, em função do ângulo de aplicação do campo magnético externo, para a amostra circular [Py(100Å)/Cu(25Å)]x50.

Após analisarmos essas curvas de magnetização para os dois tipos de espaçadores, notamos que houve uma maior indução de anisotropias nas amostras com prata. Isso nos revelou uma possível riqueza nas medidas de MI, pois as curvas de magnetização das amostras com espaçadores de cobre não apresentaram uma indução forte de anisotropias. Veremos a seguir as medidas de MI para poder comprovar as alterações causadas nos diversos tipos de amostras fabricadas.

4.2. Medidas de magnetoimpedância e as relações de dispersão

As medidas de magnetoimpedância foram realizadas no sistema de análise de impedância em altas frequências do LMMM – UFSM, mostrado anteriormente na Figura 3-19 e Figura 3-20, na faixa de frequências de 100kHz a 1.8GHz. A aquisição dos dados é feita para 201 valores de frequências distribuídos nessa faixa. Como para os valores de frequências baixos, cerca de alguns MHz o efeito MI é muito pequeno, portanto, escolhemos apenas oito valores de frequências para apresentação nos gráficos de MI.

Através do efeito MI calculamos as relações de dispersão para as amostras que apresentaram FMR. Tais relações são mostradas nos gráficos da frequência de ressonância *versus* campo magnético aplicado ($f_r \times H$). Também foi utilizado outro método para verificar a relação de dispersão. Esse método é o dos mapas de cores que também pode fornecer tal relação.

Nas próximas seções serão mostrados dois tipos de gráficos: o dos mapas de cores e o da relação de dispersão nas amostras em que se pode obter a relação de dispersão através deles. Fazemos essa distinção pois em algumas amostras não se pode obter a relação de dispersão pelos dois métodos. Nesses casos apresentaremos os mapas de cores que através dos quais mostraremos o comportamento dessas dispersões.

Apresentaremos a seguir várias curvas relacionadas ao efeito MI e a relação de dispersão separadamente nos dois grupos de amostras com os dois tipos de espaçadores metálicos e não magnéticos, cobre e prata.

4.2.1. Multicamadas de Py/Ag

Em todas as combinações de amostras com 15 bicamadas os sinais da resistência e da reatância são um pouco ruidosos e também apresentaram o menor valor percentual de MI, ou seja $\Delta Z / Z_{\text{máx}}(\%)$.

Na Figura 4-25 e Figura 4-26 estão mostradas as curvas para a amostra com cortes longitudinal e transversal, respectivamente, e com camadas de 100\AA de Py separadas por camadas de 7\AA de Ag repetidas 15 vezes. As amostras com corte longitudinal apresentaram uma estrutura de picos duplos para todas essas frequências apresentadas e chegando a uma razão máxima de MI de 7% para a frequência de 1.8GHz.

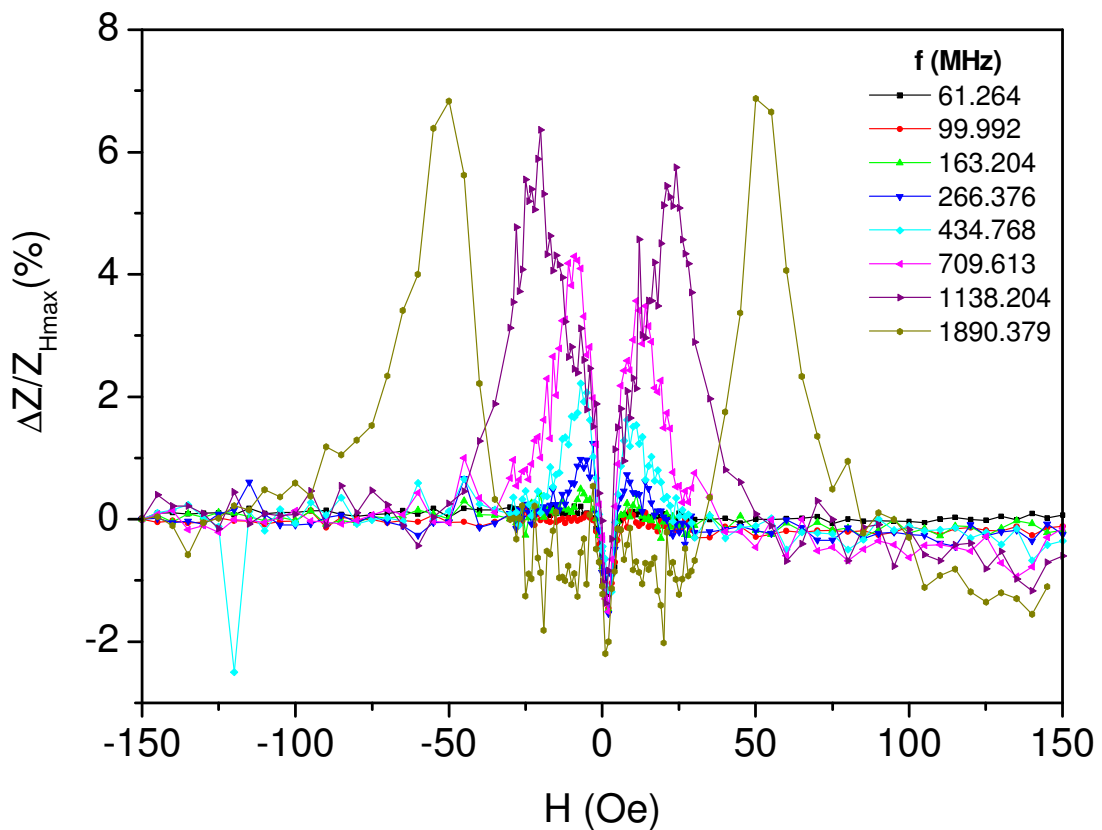


Figura 4-25. Curvas de MI x H para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{15}$ com corte longitudinal.

Na amostra com corte transversal, as curvas de MI apresentaram uma estrutura de pico único até frequências da ordem de 700MHz, mas acima dessa frequência uma estrutura de picos duplos foi observada. A razão máxima de MI ficou em torno de 4,5%. A razão MI em porcentagem, a qual estamos nos referindo nas curvas apresentadas, é a razão $\Delta Z / Z_{H_{max}}(\%)$.

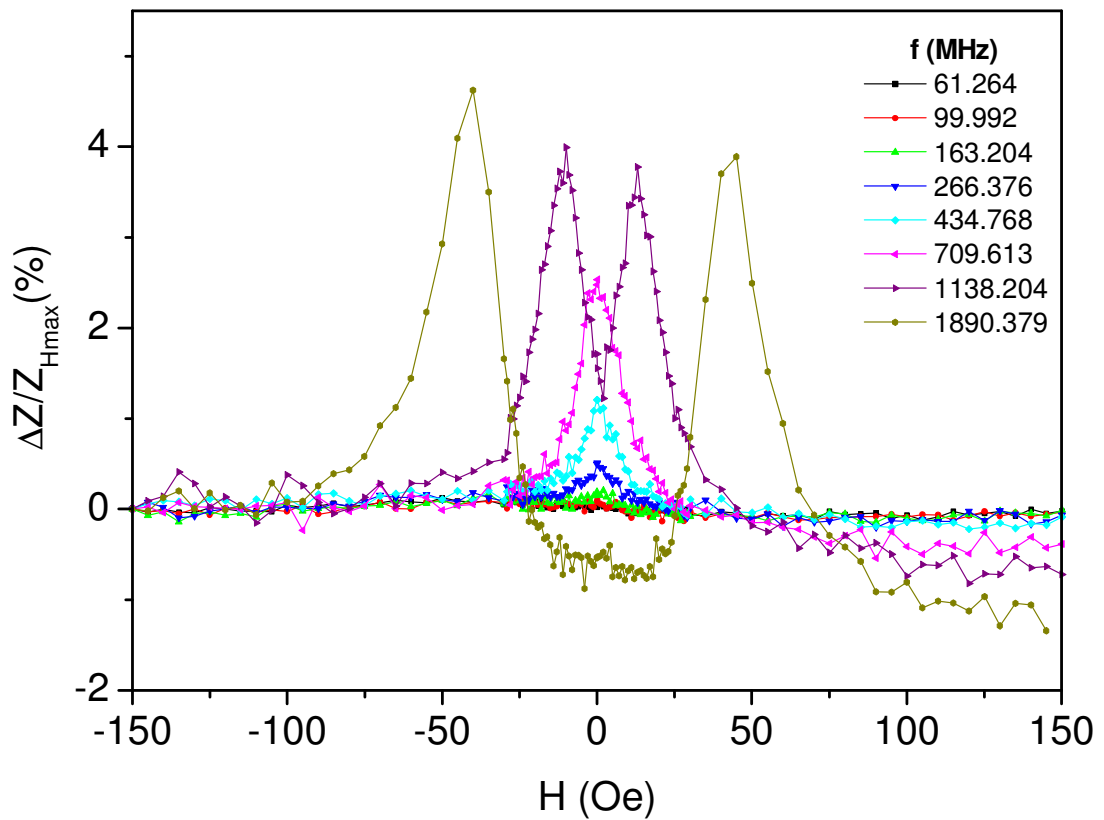


Figura 4-26. Curvas de MI x H para a amostra [Py(100Å)/Ag(7Å)]x15 com corte transversal.

As amostras com 100\AA de Py separadas por 7\AA de Ag repetidas 50 vezes já apresentaram uma sensível aumento na razão MI, além de ter uma melhora no sinal, ou seja, uma medida com muito pouco ruído. As curvas para os dois tipos de cortes apresentaram uma estrutura muito semelhante. Na Figura 4-27 estão mostradas as curvas para a amostra com corte longitudinal, onde apresentou uma estrutura de picos duplos, discreta para as frequências mais baixas mas bem definida nas frequências mais altas, chegando a apresentar uma razão MI de 86% na frequência de 1.8GHz.

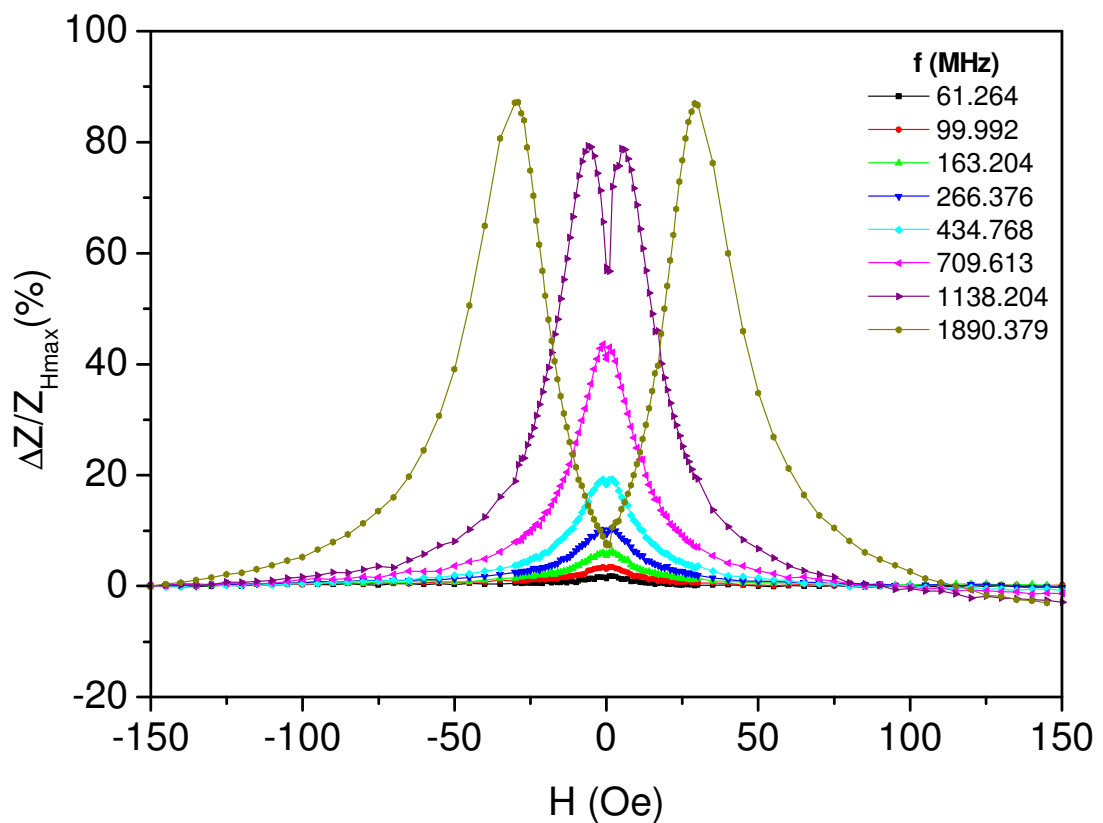


Figura 4-27. Curvas de MI x H para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{50}$ com corte longitudinal.

Na Figura 4-28 apresentamos o mapa de cores para ilustrar o comportamento qualitativo da relação de dispersão. A Figura 4-29 mostra a relação de dispersão experimental retirada das medidas de MI para a mesma amostra. Nas duas figuras pode-se notar que uma estrutura em V é apresentada.

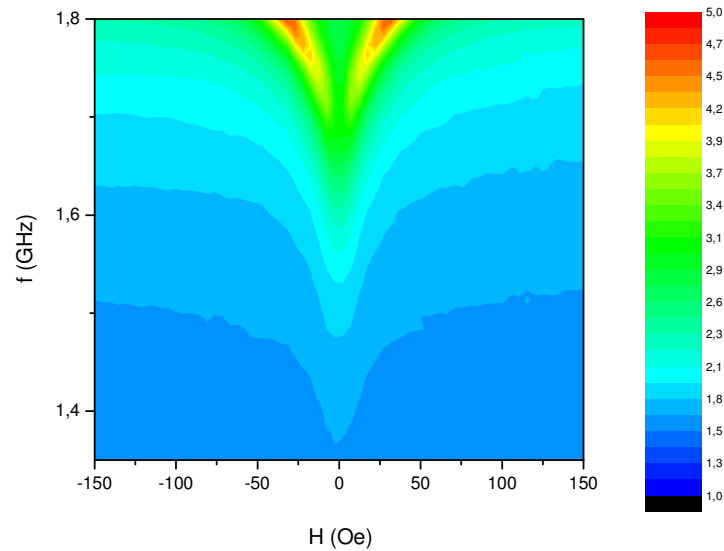


Figura 4-28. Mapa de cores $R \times H \times f$ para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{\times 50}$ com corte longitudinal.

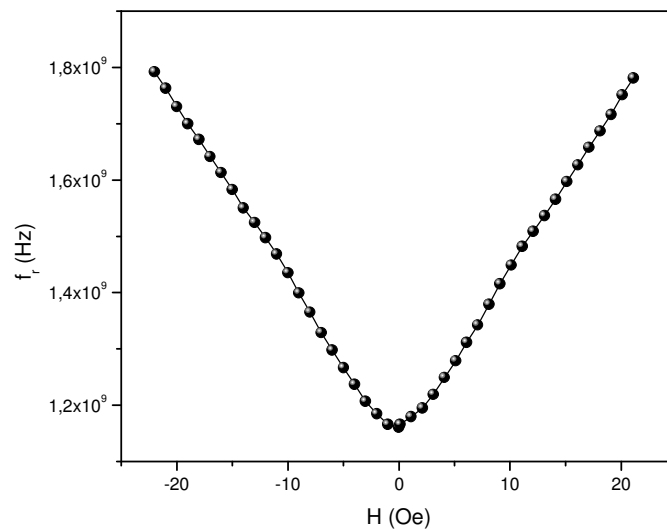


Figura 4-29. Relação de dispersão obtida experimentalmente para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{\times 50}$ com corte longitudinal.

Na Figura 4-30 estão mostradas as curvas da razão MI para a amostra com corte transversal. Essa amostra apresentou uma estrutura de picos duplos para toda a faixa de frequência mostrada e chegou a 94% sua razão MI também na frequência de 1.8GHz.

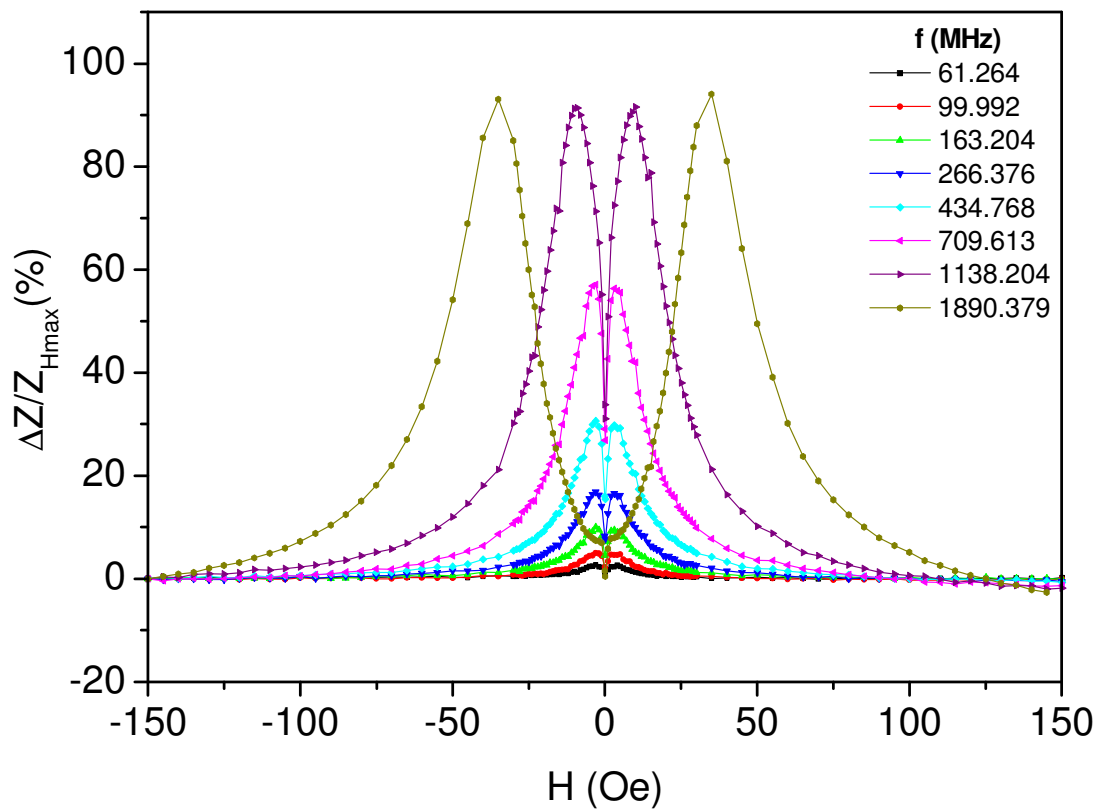


Figura 4-30. Curvas de MI x H para a amostra $[Py(100\text{\AA})/Ag(7\text{\AA})]_{x50}$ com corte transversal.

Na Figura 4-31 o mapa de cores mostra um comportamento diferente do da amostra com corte longitudinal. Uma estrutura em forma de W é observada e confirmada na Figura 4-32 da relação de dispersão experimental.

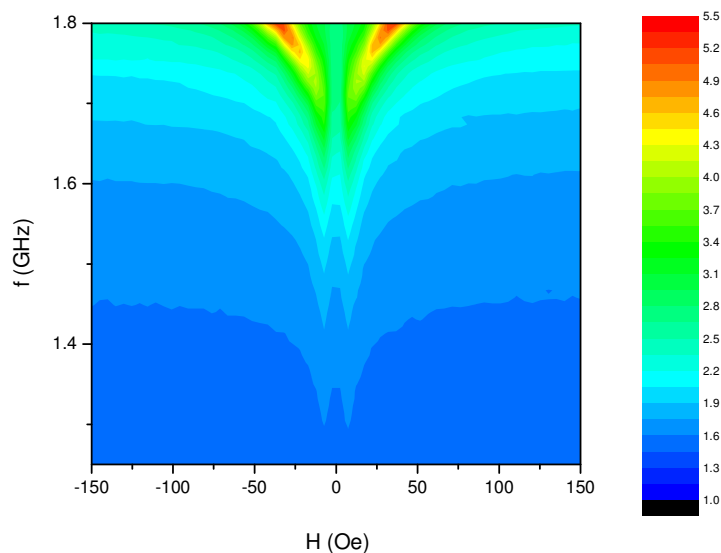


Figura 4-31. Mapa de cores $R \times H \times f$ para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{\times 50}$ com corte transversal.

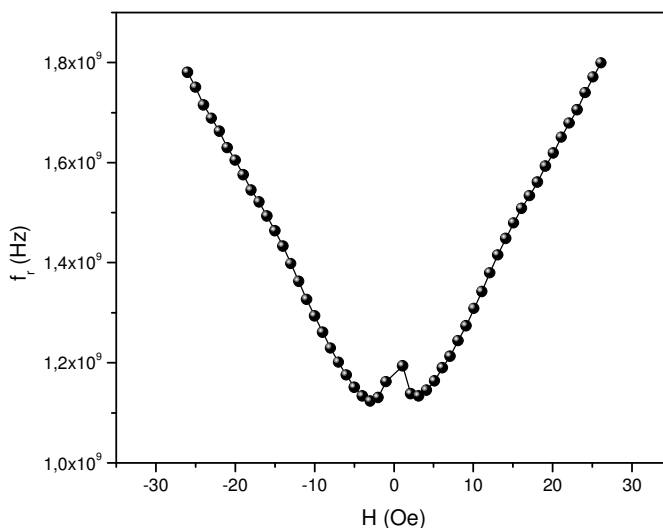


Figura 4-32. Relação de dispersão obtida experimentalmente para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})]_{\times 50}$ com corte transversal.

Nas amostras com 100Å de Py separadas por 7Å de Ag repetidas 100 vezes observamos um aumento significativo na razão MI, sendo praticamente dobrada.

Na Figura 4-33 são apresentadas as curvas da razão MI para uma amostra com corte longitudinal, onde se observa uma estrutura de picos duplos bem definida para toda a faixa de frequência mostrada. Um bom resultado em termos de razão MI foi observado, pois ela chegou a 172% na frequência de 1.1GHz.

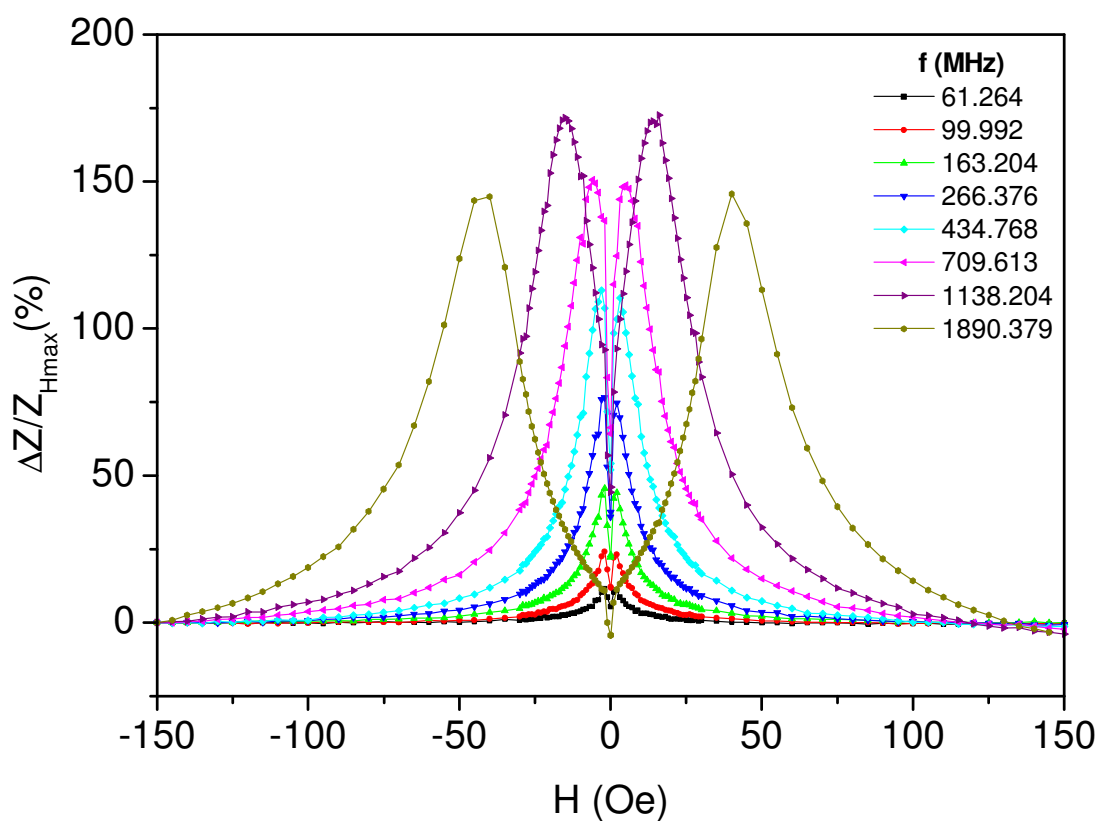


Figura 4-33. Curvas de MI x H para a amostra [Py(100Å)/Ag(7Å)]x100 com corte longitudinal.

Na Figura 4-34 o mapa de cores mostra uma estrutura na forma de W para a relação de dispersão, a qual é confirmada pela relação de dispersão experimental da Figura 4-35.

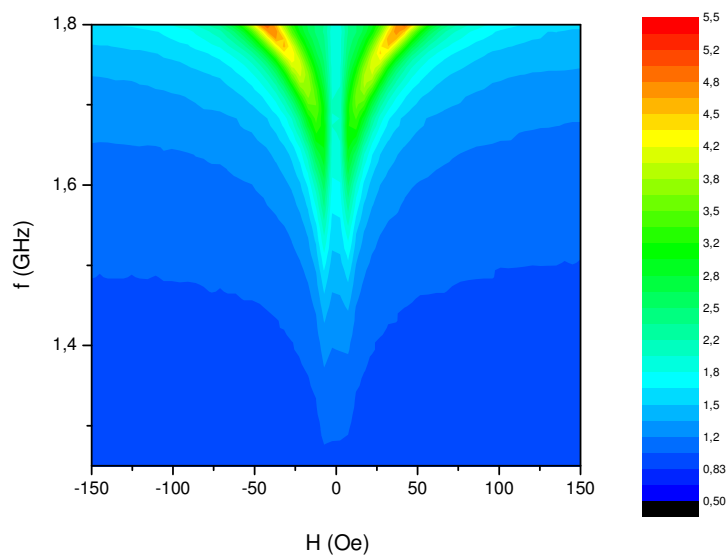


Figura 4-34. Mapa de cores $R \times H \times f$ para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})] \times 100$ com corte longitudinal.

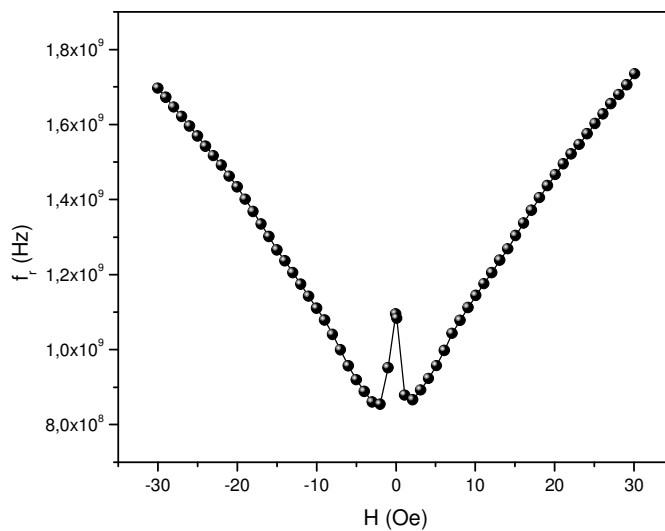


Figura 4-35. Relação de dispersão obtida experimentalmente para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})] \times 100$ com corte longitudinal.

A amostra com corte transversal da Figura 4-36 apresentou uma estrutura bem definida de picos duplos semelhantes à com corte longitudinal. A razão MI aumentou um pouco, chegando a 178% também para a frequência de 1.1GHz.

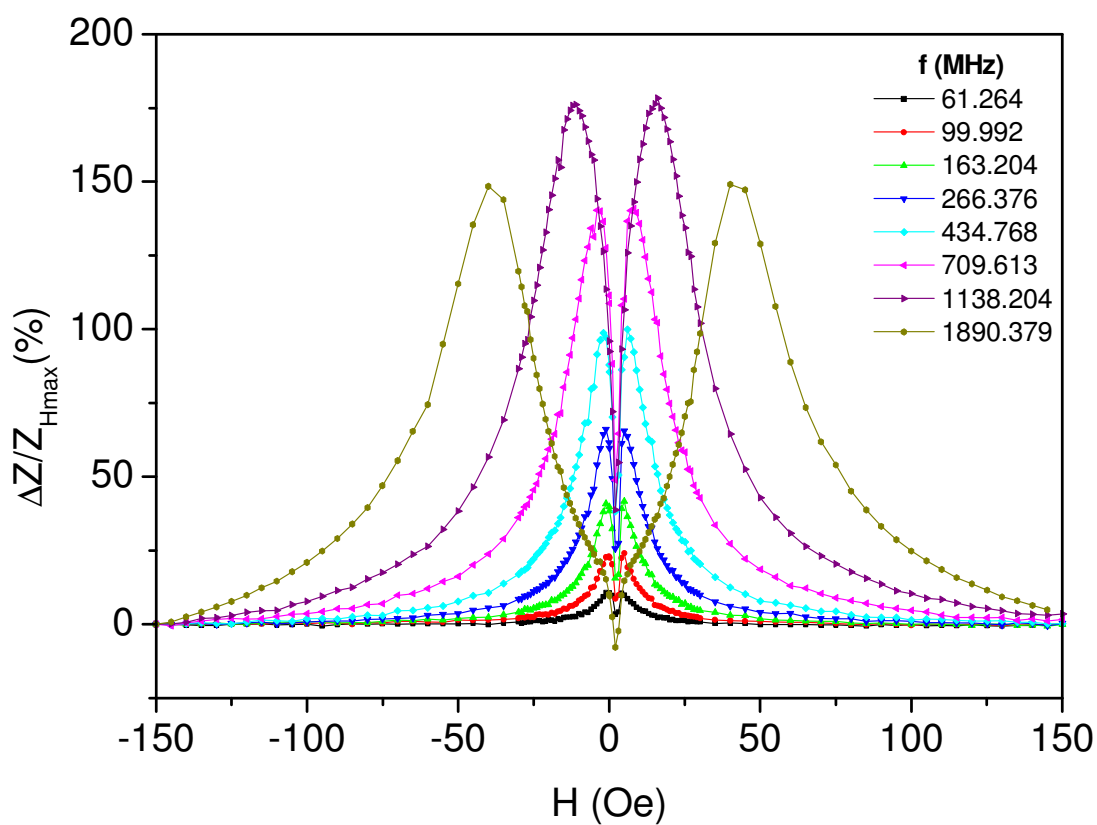


Figura 4-36. Curvas de MI x H para a amostra [Py(100Å)/Ag(7Å)]x100 com corte transversal.

Na Figura 4-37 o mapa de cores apresenta uma estrutura também em W, a qual é confirmada pela Figura 4-38 da relação de dispersão experimental.

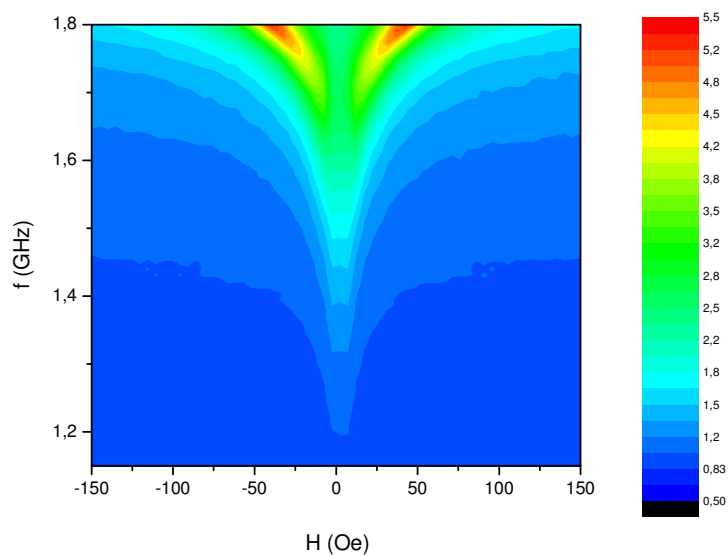


Figura 4-37. Mapa de cores $R \times H \times f$ para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})] \times 100$ com corte transversal.

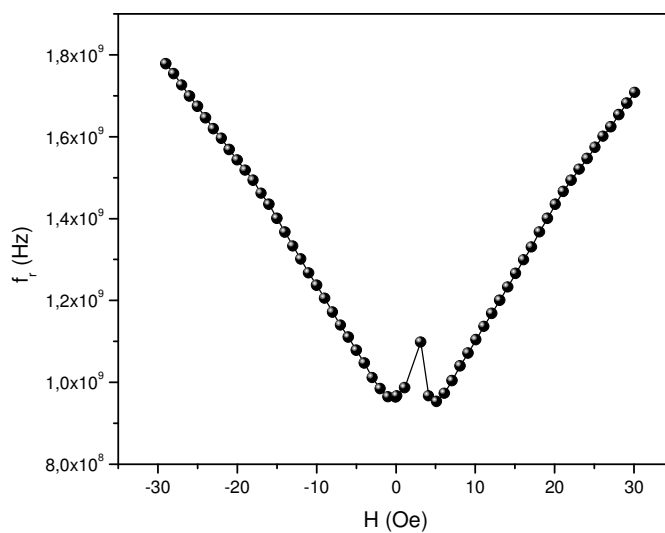


Figura 4-38. Relação de dispersão obtida experimentalmente para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(7\text{\AA})] \times 100$ com corte transversal.

Na Figura 4-39 temos os gráficos da razão MI máxima versus a frequência para as amostras de Py(100Å)/Ag(7Å) com 15, 50 e 100 bicamadas, onde L indica o corte longitudinal e T o corte transversal. Notou-se que nas amostras com 15 e 50 bicamadas o valor de MI_{max} aumenta lentamente até a frequência de 500MHz e para frequências mais altas o aumento é mais rápido, chegando a 7 e 100% para as frequências mais altas nas amostras com 15 e 50 bicamadas, respectivamente. Nas amostras com 100 bicamadas é rápido e praticamente linear até a frequência de 500MHz e para as frequências mais altas essa taxa de aumento começa a diminuir e a MI_{max} foi de 170% na frequência de 1.1GHz. Nas amostras com 50 e 100 bicamadas os valores de MI_{max} foram praticamente os mesmos para os dois tipos de cortes nessa faixa de frequências. Apenas na amostra com 15 bicamadas houve uma diferença maior entre esses valores para os dois tipos de cortes.

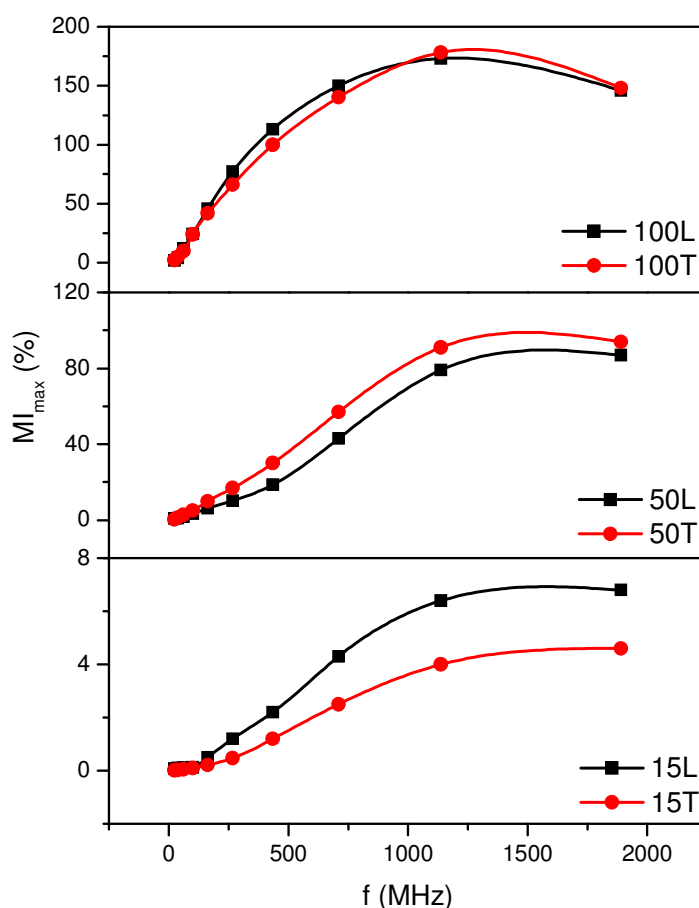


Figura 4-39. Gráficos da razão MI máxima versus frequência para a série de amostras Py(100Å)/Ag(7Å) com 15, 50 e 100 bicamadas, onde L e T referem-se aos cortes longitudinal e transversal respectivamente.

As amostras a seguir têm a composição citada anteriormente como as que apresentaram resultados surpreendentes. Estas amostras têm camadas com 100Å de Py separadas por 25Å de Ag $\left(\frac{\tau_{Py}}{\tau_{Ag}} = 4\right)$. Por isso, serão apresentados além das curvas da razão MI *versus* H e dos mapas de cores da frequência *versus* campo *versus* resistência, além do gráfico da impedância (resistência e reatância) *versus* H.

Na Figura 4-40 são mostradas as curvas da razão MI *versus* H para uma amostra com 15 bicamadas. Nessa amostra pode-se observar uma estrutura de picos duplos para as frequências mais baixas e uma estrutura com seis picos bem definidos na frequência de 1.8GHz, onde se observa uma razão MI de 5,6%. Essa estrutura será chamada de múltiplos picos ou, nesse caso, de picos sêxtuplos. Esse resultado é novo para o efeito MI, pois até agora apenas estruturas com picos únicos e com picos duplos eram observadas.

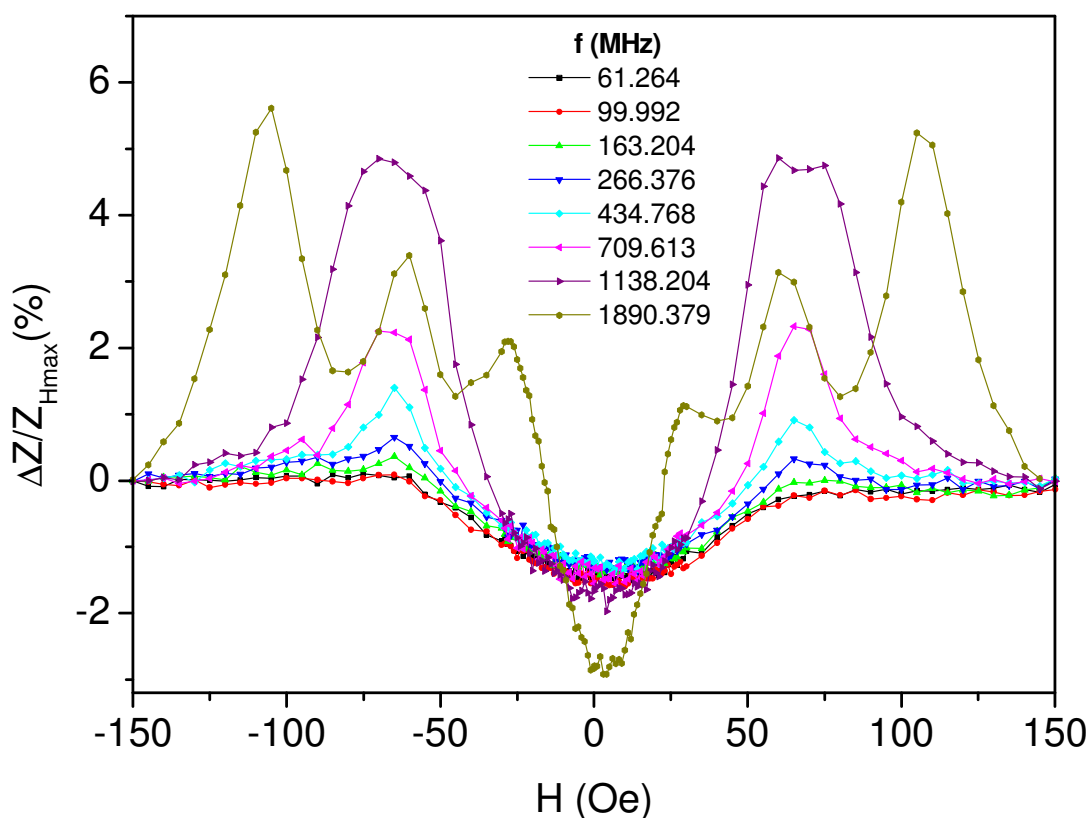


Figura 4-40. Curvas de MI x H para a amostra [Py(100Å)/Ag(25Å)]x15 com corte longitudinal.

Na Figura 4-41, é mostrado um mapa de cores para a mesma amostra. Esse gráfico mostra um mapa topográfico colorido da superfície, onde no eixo horizontal tem-se o H, no eixo vertical a frequência e na superfície a resistência R. Ao lado dele temos uma barra com os valores referentes à R, os quais correspondem às cores que variam do azul (valor mínimo) ao vermelho (valor máximo). Nesses mapas podemos ver a evolução dos picos e suas intensidades, bem como os valores de frequências nos quais acontecem a transição de uma estrutura de picos duplos para quádruplos e para sêxtuplos.

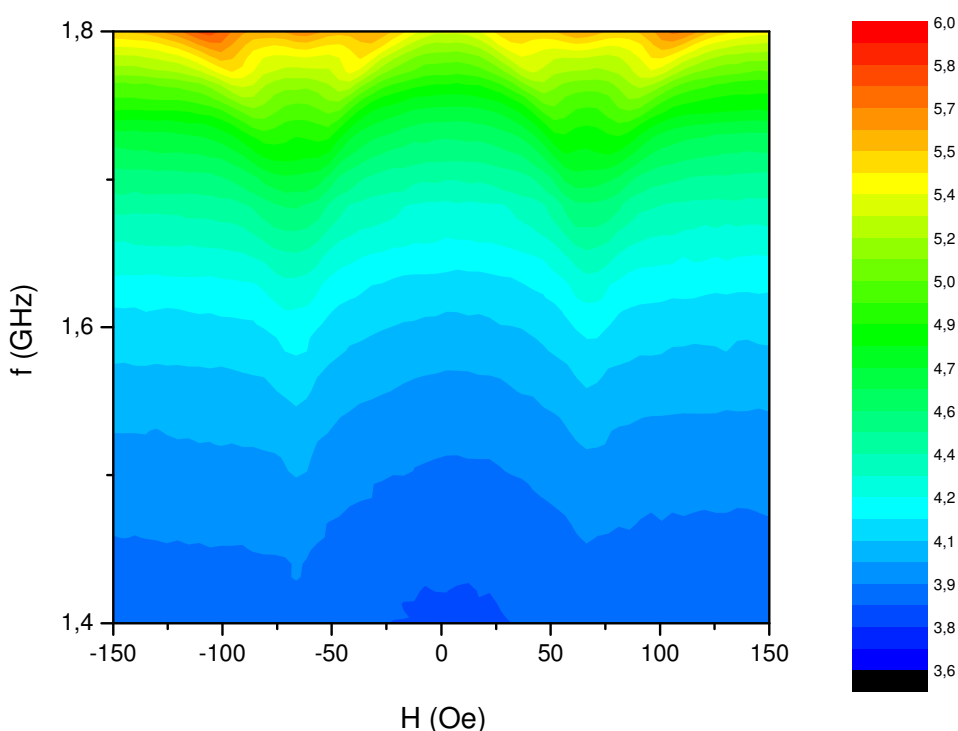


Figura 4-41. Mapa de cores $R \times H \times f$ para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(25\text{\AA})]_{\times 15}$ com corte longitudinal.

Para as amostras com espaçadores de Ag e com essa composição de $\frac{\tau_{\text{Py}}}{\tau_{\text{Ag}}} = 4$ não foi possível retirar das medidas de MI a relação de dispersão experimental, pois como a estrutura de múltiplos picos foi observada aqui pela primeira vez, o método usado nas amostras anteriores não foi possível de ser usado. De qualquer forma, analogamente ao mostrado anteriormente, uma estrutura com dois W foi observada (W W).

Na Figura 4-42 serão mostrados oito gráficos que mostram a evolução da impedância Z , parte resistiva e parte reativa versus campo magnético aplicado H , com a frequência. Nesses gráficos se puderam observar as estruturas de múltiplos picos também nos valores de resistência. Esses picos, ou seja, valores máximos de resistência coincidem com os valores mínimos (passagem pelo zero) da reatância, o qual indica múltiplas ressonâncias ferromagnéticas.

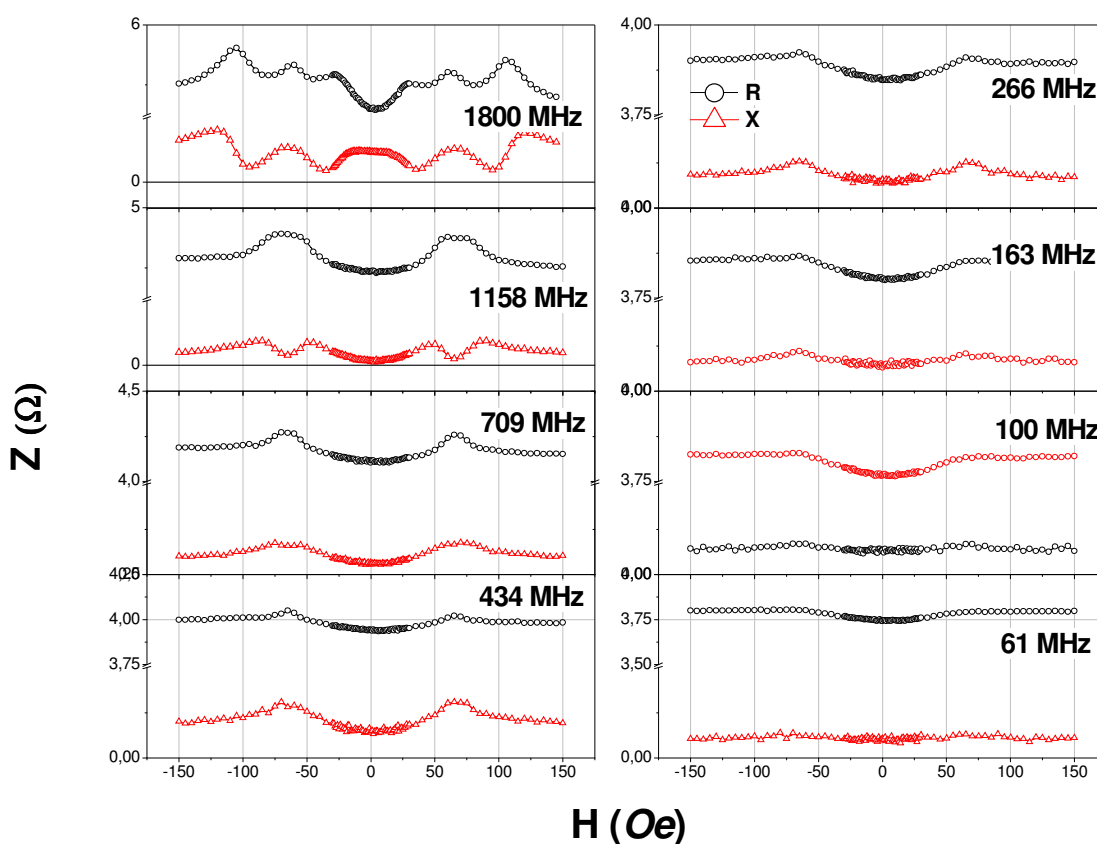


Figura 4-42. Curvas de $Z \times H$, para as várias frequências, da amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(25\text{\AA})]_{15}$ com corte longitudinal.

Na Figura 4-43 são mostradas as curvas da razão MI versus H para a mesma composição, porém com corte transversal. Com esse tipo de corte, as amostras apresentaram uma estrutura de picos únicos para todas as frequências estudadas. A razão MI aumentou significativamente, pois chegou a 13,5% para a frequência de 1.8GHz.

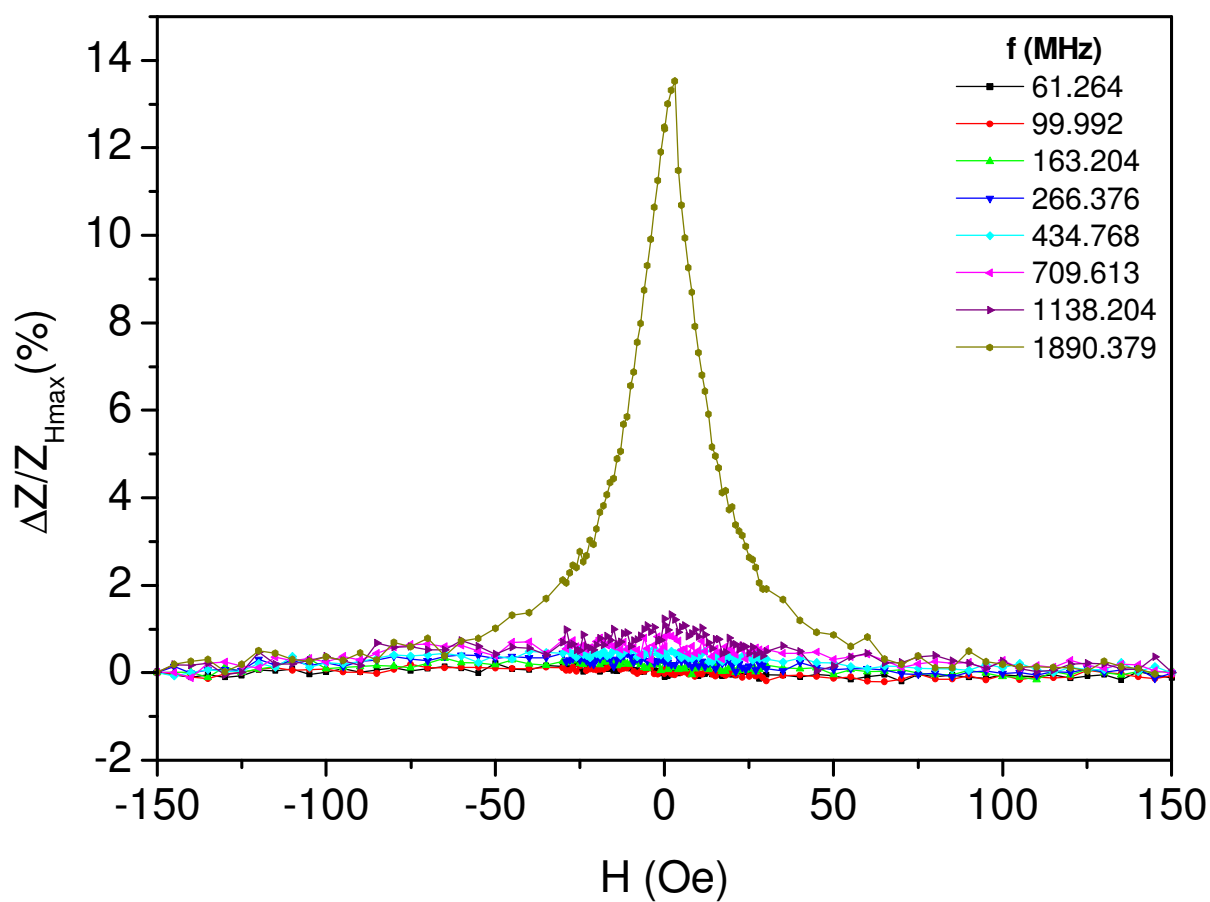


Figura 4-43. Curvas de MI x H para a amostra [Py(100Å)/Ag(25Å)]x15 com corte transversal.

Na Figura 4-44 é mostrado o mapa de cores para essa amostra, onde pode-se perceber a evolução e a intensidade dos picos de R, que nesse caso foram picos únicos para todos os valores de frequências estudadas. Assim, dá para dizer que uma possível estrutura na forma de V seria observada na relação de dispersão.

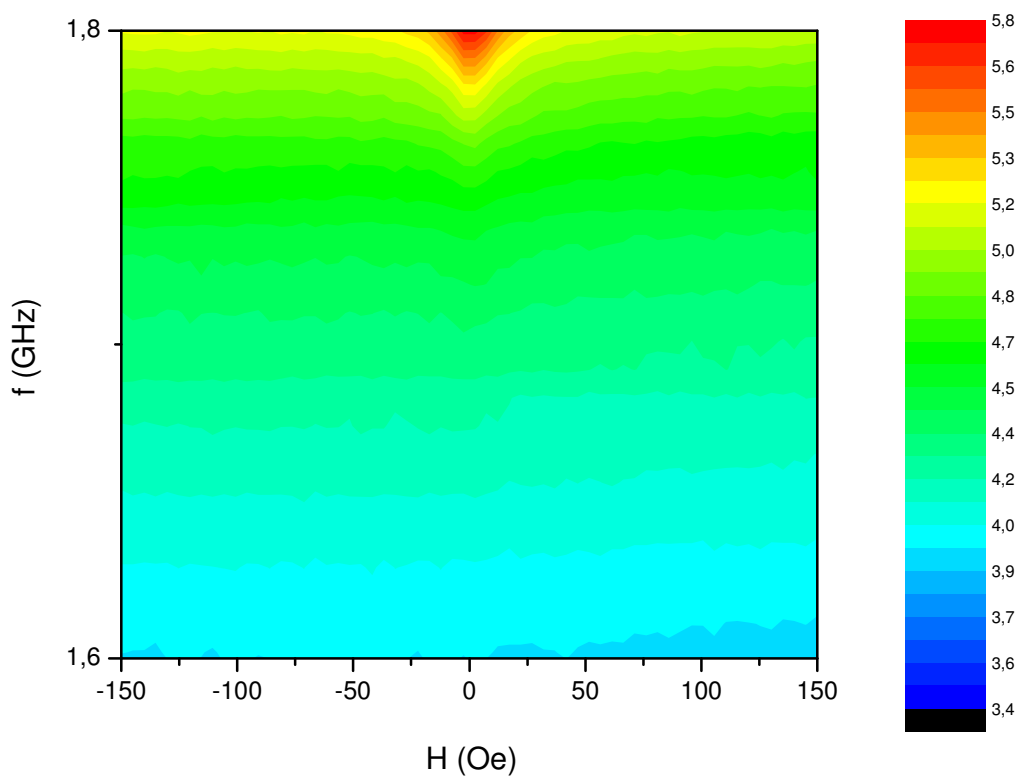


Figura 4-44. Mapa de cores $R \times H \times f$ para a amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(25\text{\AA})] \times 15$ com corte transversal.

Na Figura 4-45 são mostradas as componentes resistivas e reativas da impedância Z , para as várias frequências estudadas, versus o campo magnético aplicado H . Na curva para a frequência de 1.8GHz, onde o pico é mais pronunciado, pode-se ver que o máximo da resistência coincide com o mínimo da reatância, o que era de se esperar mesmo para pico único.

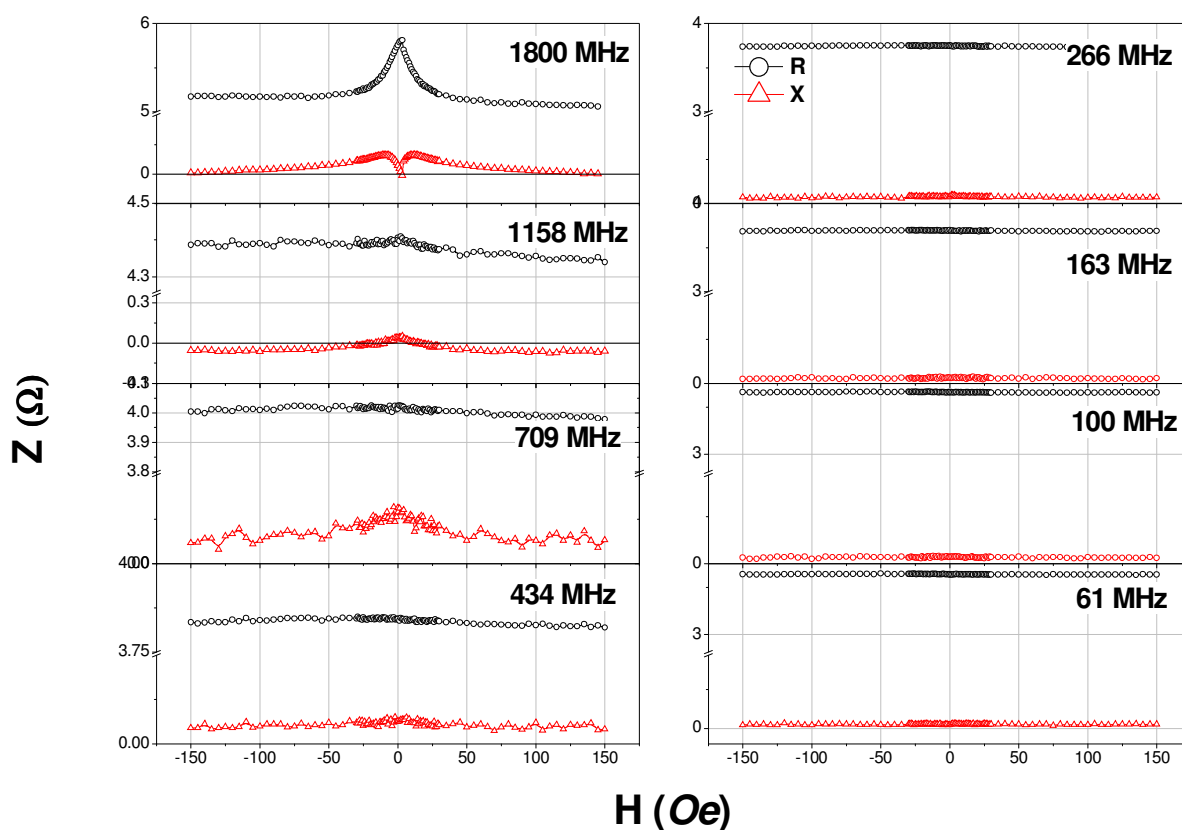


Figura 4-45. Curvas de $Z \times H$, para as várias frequências, da amostra $[\text{Py}(100\text{\AA})/\text{Ag}(25\text{\AA})]_{15}$ com corte transversal.

Nas próximas seis figuras serão mostrados os resultados para as amostras com mesma composição anterior, porém com 30 bicamadas.

Na Figura 4-46 para a amostra com corte longitudinal também pode ser observada uma estrutura de múltiplos picos na frequência de 1.8GHz. Nesse caso é uma estrutura de picos quádruplos. A maior razão MI foi de aproximadamente 51% na frequência de 1.1GHz.

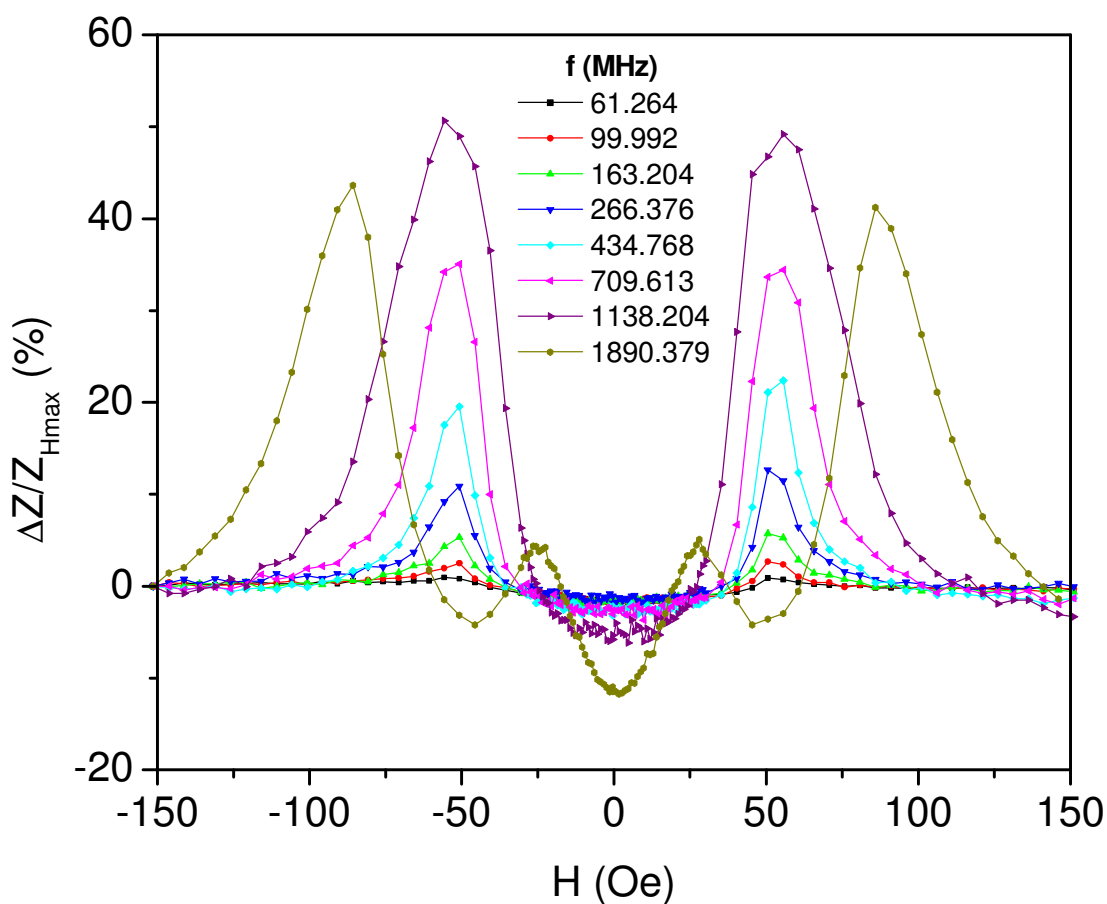


Figura 4-46. Curvas de MI x H para a amostra [Py(100Å)/Ag(25Å)]x30 com corte longitudinal.